



Fusion de données, estimation de la posture et navigation à l'estime : Application au Bio-logging

Hassen Fourati, Nouredine Manamanni, Yves Handrich

► To cite this version:

Hassen Fourati, Nouredine Manamanni, Yves Handrich. Fusion de données, estimation de la posture et navigation à l'estime : Application au Bio-logging. Editions Universitaires Européennes, pp.208, 2012, Mathématiques, 978-3-8417-8971-6. hal-00690144

HAL Id: hal-00690144

<https://hal.science/hal-00690144>

Submitted on 23 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fusion de données, estimation de la posture et navigation à l'estime : Application au Bio-logging

H. Fourati, N. Manamanni**, Y. Handrich****

**Equipe Systèmes et Commandes en Réseaux, Département d'Automatique, GIPSA-LAB, UMR
5216, Grenoble INP, 38402 Saint Martin d'Hères, Grenoble, France, (e-mail :*

hassen.fourati@gipsa-lab.grenoble-inp.fr)

***CReSTIC, URCA, EA 3804 - Université de Reims Champagne-Ardenne, UFR SEN, Moulin de la
Housse, 51687 Reims Cedex 2 France (e-mail : noureddine.manamanni@univ-reims.fr)*

****Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIEN / Département Ecologie, Physiologie et Ethologie,
UMR 7178 CNRS - Université de Strasbourg, 67037 Strasbourg, France, (e-mail : yves-jean.handrich@iphc.cnrs.fr)*

Préface

Ce travail rentre dans le cadre d'un projet de recherche *NaviMeles* qui a été initié par le *Département d'Ecologie, Physiologie et Ethologie (DEPE)* de l'Université de Strasbourg (France) en collaboration avec l'équipe Automatique du *Centre de recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (CReSTIC)* de l'Université de Reims Champagne Ardenne (France). Le financement de ce projet a été assuré par les régions Alsace et Champagne Ardenne.

Les principaux contributeurs de ce travail sont :

Hassen Fourati, Maître de Conférences, Université Joseph Fourier, Grenoble, France

Noureddine Manamanni, Professeur des Universités, Université de Reims Champagne Ardenne, France

Yves Handrich, Chargé de Recherche (CR1-HDR), Université de Strasbourg, France

Lissan Afilal, Professeur des Universités, Université de Reims Champagne Ardenne, France

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier **M. Janan Zaytoon**, directeur du Centre de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (CReSTIC, EA3804) de l'Université de Reims Champagne Ardenne (URCA), pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, ainsi que **M. Bernard Riera**, Professeur à l'Université de Reims Champagne Ardenne et responsable du groupe *Automatique et Systèmes Hybrides* au sein du CReSTIC.

Mes remerciements s'adressent également à **M. Daniel Huss**, directeur de l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC, UMR 7178) de l'Université de Strasbourg (UDS), pour m'avoir accueilli au sein de son unité. Je tiens à remercier également **M. Jean-Yves Georges**, Chargé de Recherche (CR1) et responsable de l'équipe *Stratégies Energétiques et Comportementales* au sein du DEPE.

Toute ma reconnaissance pour mes directeurs de thèse, **M. Nouredine Manamanni**, Professeur à l'Université de Reims Champagne Ardenne, **M. Lissan Afilal**, Professeur à l'université de Reims Champagne Ardenne et **M. Yves Handrich**, Chargé de recherche (CR1-HDR) au DEPE-IPHC-CNRS à l'Université de Strasbourg.

Je voudrais aussi remercier toute ma famille et ma fiancée Emna pour tout leur soutien inconditionnel ainsi que mes chers collègues de travail, avec lesquels j'ai partagé tant de belles choses.

Enfin, je remercie d'avance tous les futurs lecteurs et lectrices qui prendront la peine de parcourir ce livre, car remercier quelqu'un, c'est avant tout s'assurer de son indulgence...

Hassen Fourati (Janvier 2012)

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre 1

Outils nécessaires à l'estimation de l'attitude d'un corps rigide	5
1.1. Introduction	5
1.2. Définitions et notations	6
1.2.1. Définition d'un corps rigide	6
1.2.2. Attitude d'un corps rigide	6
1.2.3. Les systèmes de coordonnées nécessaires à la représentation de l'attitude	6
1.2.3.1. Système de coordonnées mobiles	7
1.2.3.2. Système de coordonnées fixes	7
1.2.4. Les formes de représentation de l'attitude	8
1.2.4.1. Les matrices de rotations	8
1.2.4.2. Les quaternions	10
1.2.4.3. Les angles d'Euler	14
1.2.4.4. Les paramètres de Rodrigues	17
1.2.5. Représentation de l'attitude : Analyse et choix	18
1.3. Les principaux systèmes de perception proprioceptifs de l'attitude	21
1.3.1. Les accéléromètres	22
1.3.1.1. Définition et principe de mesure	22
1.3.1.2. Modèle mathématique de mesure d'un accéléromètre	24
1.3.2. Les inclinomètres	24
1.3.3. Les magnétomètres	25
1.3.3.1. Définition et principe de mesure	25
1.3.3.2. Modèle mathématique de mesure d'un magnétomètre	28
1.3.4. Les gyroscopes	29
1.3.5. Les gyrocompas	29
1.3.6. Les gyromètres	29
1.3.6.1. Définition et principe de mesure	29

1.3.6.2. Modèle mathématique de mesure d'un gyromètre	31
1.4. Capteurs d'attitude à base de technologie MEMS	32
1.5. Exemples de systèmes inertiels de calcul de l'attitude.....	33
1.6. Conclusion	34

Chapitre 2

Application de l'estimation de l'attitude au Bio-logging	36
2.1. Introduction	36
2.2. Bio-logging : une méthode pour comprendre les systèmes naturels.....	37
2.2.1. Principales contraintes liées à l'étude de la biologie de certains organismes.....	37
2.2.2. Nouvelles frontières dans l'étude des organismes avec le Bio-logging	38
2.2.2.1. Localisation par télémétrie et GPS	39
2.2.2.2. Techniques d'enregistrement sur le <i>logger</i>	40
2.2.2.3. Discussion.....	42
2.2.3. Approche Bio-logging à l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien	43
2.2.3.1. Les micro-loggers.....	43
2.2.3.2. Les macro-loggers	44
2.3. Projet <i>NaviMeles</i> : présentation et objectifs	45
2.3.1. Présentation du projet	45
2.3.2. Objectifs du projet.....	45
2.3.3. Prototype final à l'issue du projet.....	48
2.4. Estimation de l'attitude d'un corps rigide à partir de capteurs inertiels et magnétiques.....	49
2.4.1. Etat de l'art et domaines d'application	49
2.4.1.1. Les véhicules aériens autonomes	49
2.4.1.2. Les robots et véhicules terrestres	50
2.4.1.3. Les véhicules marins.....	51
2.4.1.4. La capture du mouvement humain.....	52
2.4.1.5. La robotique médicale.....	53
2.4.1.6. Estimation de l'attitude, une nouvelle application en Bio-logging	53
2.4.2. Discussion	57
2.5. Principaux estimateurs d'attitude	60
2.5.1. Estimateurs d'attitude basés sur les techniques de moindres carrés	60
2.5.2. Estimateurs d'attitude basés sur les filtres de Kalman	62
2.5.3. Estimateurs d'attitude basés sur les observateurs non linéaires	64
2.5.4. Discussion et choix.....	66
2.6. L'attitude : information essentielle en énergétique et en <i>dead reckoning</i>	67
2.7. Conclusion	68

Chapitre 3

Fusion des capteurs pour la restitution de l'attitude : théories et résultats de simulations..... 70

3.1. Introduction et organisation du chapitre	70
3.2. Position du problème	71
3.3. Estimateurs d'attitude proposés	72
3.3.1. Approche 1 : Estimation par observateur non linéaire à l'aide d'une technique d'addition de quaternion	73
3.3.1.1. Modèle d'état considéré	73
3.3.1.2. Observateur non linéaire additif de l'attitude	74
3.3.1.3. Détermination du quaternion de mesure q_m	75
3.3.1.4. Analyse de la stabilité	76
3.3.1.5. Résultats de simulation obtenus avec l'approche 1	79
3.3.2. Approche 2 : Estimation par observateur non linéaire à l'aide d'une technique de multiplication de quaternion	83
3.3.2.1. Système d'état considéré	84
3.3.2.2. Observateur à modes glissants de l'attitude.....	85
3.3.2.3. Exemples de résultats de simulation obtenus avec l'approche 2	88
3.3.3. Approche 3 : Estimation par filtre complémentaire à l'aide d'une technique de multiplication de quaternion	91
3.3.3.1. Système d'état considéré	91
3.3.3.2. Filtre complémentaire de l'attitude	91
3.3.3.3. Analyse de performance du filtre complémentaire	94
3.3.3.4. Résultats de simulation obtenus avec l'approche 3	96
3.4. Synthèse et conclusion	100

Chapitre 4

Evaluations expérimentales des algorithmes d'estimation de l'attitude 103

4.1. Introduction	103
4.2. Outils et dispositifs expérimentaux utilisés	103
4.3. Validation préliminaire des approches d'estimation de l'attitude	106
4.3.1. Résultats obtenus lors d'une phase statique de mouvement	107
4.3.2. Résultats obtenus lors d'une phase dynamique de mouvement.....	109
4.4. Mise en œuvre expérimentale lors du mouvement de membre humain.....	111
4.4.1. Processus expérimental suivi	111
4.4.2. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus	112
4.5. Mise en œuvre expérimentale lors du mouvement d'un animal	116
4.5.1. Essai expérimental de reconstitution de l'attitude d'un chien	116
4.5.1.1. Processus expérimental suivi	116
4.5.1.2. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus	118
4.5.2. Essai expérimental de reconstitution de l'attitude d'un cheval.....	121
4.5.2.1. Processus expérimental suivi.....	121

4.5.2.2. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus	123
4.6. Analyse et synthèse des performances de l'estimation de l'attitude	125
4.6.1. Comparaison des performances avec une centrale d'attitude <i>MTi</i>	125
4.6.2. Comparaison des performances avec des méthodes du Bio-logging	129
4.6.2.1. Résultats issus de l'essai expérimental sur le chien	129
4.6.2.2. Résultats issus de l'essai expérimental sur le cheval.....	133
4.7. Conclusion	136

Chapitre 5	
Navigation à l'estime : approche préliminaire pour la reconstitution des déplacements 3D en vue d'une application au Bio-logging.....	137
5.1. Introduction	137
5.2. Reconstitution des déplacements 3D par une technique de navigation à l'estime	138
5.2.1. Méthode utilisée : application à la marche d'un sujet humain.....	139
5.2.2. Résultats expérimentaux obtenus lors de la marche d'un sujet humain	141
5.3. Conclusion et motivations vers l'application de la navigation à l'estime sur l'animal..	145
Conclusions et perspectives	147
Annexe A	153
Annexe B	159
Annexe C	165
Annexe D	167
Annexe E	172
Bibliographie.....	174

Introduction générale

«Mesure ce qui est mesurable et rend mesurable ce qui ne peut pas être mesuré»
(Galilée)

L'écophysiologie est l'une des disciplines de la biologie, à la frontière entre l'écologie et la physiologie, qui étudie les réponses comportementales et physiologiques des organismes à leur environnement. Au début, l'intérêt de cette discipline avait pour origine de possibles applications à la physiologie comparée, à la médecine, mais depuis ces dernières années, il est justifié par les interrogations qui existent sur la plasticité et la survie des espèces dans une époque de surexploitation et de destruction des milieux et des ressources naturels. L'étude des animaux dans leurs habitats naturels constitue souvent un défi complexe, la première raison étant la grande difficulté d'effectuer des mesures sur ces animaux sans les perturber. Par conséquent, les informations essentielles sur leurs histoires et modes de vie, leurs comportements, leurs écologies ou physiologies, et les propriétés de leurs environnements sont encore très mal connues.

Les avancées dans les sciences et techniques de l'information et de la communication ces dernières décennies ont révolutionné les études comportementales de l'animal dans son milieu et ont permis aux biologistes d'étudier, à l'aide de divers systèmes électroniques, de nombreux animaux vivant librement dans leur environnement naturel. Aujourd'hui, la science qui étudie le comportement de l'animal en utilisant des microsystèmes attachés à son corps, ou «embarqués», appelés *loggers*, est connue sous l'appellation *Bio-logging* (Boyd *et al.*, 2004). Cette thématique multidisciplinaire à l'intersection de l'écophysiologie et de l'électronique a connu ces dix dernières années un grand intérêt tant aux niveaux manifestations que publications scientifiques. Au fil du temps, le développement des *loggers* a subi un remarquable essor au niveau du compromis taille, autonomie et performance de mesure. Il est ainsi devenu possible d'enregistrer une multitude de données sur l'animal ainsi que sur son environnement.

Avec l'arrivée de la technologie des **MEMS**¹, de nouveaux types de capteurs miniaturisés (accéléromètres et magnétomètres par exemple) sont apparus sur le marché de l'électronique embarquée offrant ainsi la possibilité aux biologistes de profiter de cette technologie pour optimiser leurs *loggers*. Avec l'augmentation parallèle des capacités de

¹ **MEMS** : Micro-Electro-Mechanical Systems

mémorisation, il a été possible de passer le cap du Hertz dans l'échantillonnage des données et d'enregistrer de nouvelles informations sur l'animal pouvant apporter d'autres indices sur son comportement telles que les mouvements locomoteurs, son accélération propre ou son attitude, appelée encore orientation spatiale ou posture. C'est pourquoi les travaux sur la reconstitution de l'attitude chez l'animal au sein du *Bio-logging* ont connu un véritable essor ces dernières années. Cette information permet de reconstruire la posture de l'animal, qui est souvent caractéristique de son activité. Une autre application des biologistes est d'utiliser les données de l'attitude pour calculer les accélérations propres de l'animal (pour évaluer le travail mécanique et les dépenses énergétiques) et remonter, quand c'est possible, à sa position 3D.

En *Bio-logging*, l'attitude de l'animal est estimée sous forme d'angles d'assiette et de cap à partir d'une fusion de données issues d'accéléromètres et de magnétomètres triaxiaux (Watanabe *et al.*, 2005 ; Wilson *et al.*, 2008 ; Elkaim *et al.*, 2006 ; Elkaim *et al.*, 2008). Ces travaux présentent des limitations et sont encore loin de résoudre le problème d'estimation de l'attitude. En effet, l'accéléromètre est un capteur d'attitude qui peut être utilisé lorsqu'il mesure uniquement la projection de la gravité dans les cas des mouvements statiques ou quasi-statiques. Lorsque ce capteur est soumis également à une force extérieure (mouvement dynamique) telle que l'accélération propre du corps, à qui il est attaché, l'estimation de l'attitude devient erronée. Hors, c'est pendant les phases non linéaires du déplacement de l'animal que se concentrent les actions de chasse, phases qui intéressent particulièrement les biologistes pour évaluer les stratégies et les rendements énergétiques des espèces dans des milieux plus ou moins altérés.

C'est dans ce contexte que se situent les travaux de recherche présentés dans ce livre. Ils font également partie d'un projet interrégional « *NaviMeles* » qui réunit plusieurs partenaires académiques et industriels et s'intéresse à l'étude écophysiologique de deux espèces animales : le manchot et le blaireau. Dans ce cadre, nous proposons principalement des méthodes alternatives d'estimation de l'attitude en *Bio-logging*, capables de tenir compte des limitations déjà observées dans les approches existantes dans le but d'améliorer la qualité de l'estimation de la posture et des attitudes de l'animal. Nous proposons d'adapter pour cela des techniques robustes d'observations d'état et de filtrage complémentaire issues de l'Automatique et/ou du Traitement du Signal afin de traiter cette problématique. Cette contribution nous offre la possibilité d'étendre par la suite ce travail à l'évaluation des accélérations propres et au calcul de la position 3D.

Par ailleurs, les études entreprises dans ce livre sont susceptibles d'avoir diverses retombées à long terme dans d'autres applications telles que la navigation pédestre et l'aide aux malvoyants ou aux personnes âgées. Ce travail pourrait être également étendu vers des applications en robotique aérienne ou marine pour des problématiques de commande et de stabilisation. Nous montrerons tout au long de ce livre que les approches

développées dans ce travail s'inspirent fortement des domaines précédemment cités mais peuvent également contribuer à les alimenter.

Ce livre, composé de *cinq chapitres*, est organisé de la façon suivante :

Le premier chapitre introduit les principaux outils nécessaires pour appréhender au mieux la problématique d'estimation de l'attitude d'un corps rigide dans l'espace. Après avoir défini la notion de l'attitude, les principaux repères pour l'exprimer ainsi que les différentes formes de représentation de l'attitude, nous retenons finalement les quaternions comme approche de représentation de la posture de l'animal. Nous décrivons ensuite l'ensemble des capteurs pouvant intervenir lors de l'estimation de l'attitude en général avec une attention particulière pour les capteurs finalement utilisés dans ce travail. Une description des différents systèmes inertiels de calcul de l'attitude en temps réel est présentée à la fin de ce chapitre.

Le second chapitre commence par définir le domaine du *Bio-logging* ainsi que les principales techniques d'enregistrement de données sur *logger*. Nous présentons d'abord les objectifs du projet dans lequel s'inscrit ce travail et particulièrement celui concernant l'estimation de l'attitude et de la posture de l'animal. Nous établissons à ce propos une étude bibliographique des principales applications où l'information sur l'attitude s'avère indispensable. Nous montrons que les inconvénients inhérents aux méthodes utilisées en *Bio-logging* d'une part et les solutions souvent proposées dans les domaines industriels (robotique aérienne ou marine) ou médicaux d'autre part nous conduisent à opter pour une approche à base de capteurs formés d'une triade d'accéléromètre, de magnétomètre et de gyromètre. Un balayage de la littérature montre que les méthodes d'estimation de l'attitude combinant les mesures issues de ces capteurs sont diverses. Nous retenons la théorie des observateurs ainsi que celle des filtres complémentaires pour proposer des approches alternatives d'estimation de l'attitude dans le troisième chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation d'une de nos contributions à l'estimation de l'attitude de l'animal, assimilé à un corps rigide. Des techniques de filtrage et d'estimation visant à reconstruire l'orientation de l'animal sont proposées dans le but d'obtenir une meilleure précision essentiellement pendant les phases dynamiques du mouvement. Nous présentons dans ce cadre trois alternatives d'estimation différentes permettant de reconstruire l'attitude sous forme de quaternion. La première est basée sur une structure d'observateur non linéaire additif alors que la deuxième est sous forme d'un observateur à modes glissants. L'idée commune à ces deux approches repose sur le calcul algébrique d'un quaternion de mesure, dans une étape préliminaire, à l'aide d'une combinaison de vecteurs d'observation issus d'un accéléromètre et d'un magnétomètre triaxiaux. Ce quaternion est combiné avec celui obtenu à partir des mesures gyrométriques pour aboutir à la fin aux estimations de l'attitude. La troisième alternative d'estimation utilise plutôt un filtre complémentaire qui combine les trois modalités de mesures sans passer par l'étape préliminaire de calcul algébrique de l'attitude. Cela

permettra de réduire le coût de calcul numérique tout en gardant les mêmes performances d'estimation du quaternion. Des simulations sous Matlab sont proposées à la suite de chaque approche afin d'examiner la performance de chacune à reconstruire le modèle de référence de l'attitude considérée.

Le **quatrième chapitre** est dédié à la validation expérimentale des approches d'estimation de l'attitude proposées dans le troisième chapitre et une analyse des résultats obtenus. Nous utilisons comme outil expérimental une centrale inertielle du marché (*MTi-G*) qui fournit les mesures d'accélération, de vitesse angulaire et de champ magnétique en plus des données GPS. Nous réalisons à cet effet des essais expérimentaux lors de divers mouvements d'un sujet humain et de deux animaux domestiques. Au cours de ces tests, nous comparons nos résultats d'estimation, issus d'une combinaison d'accéléromètre, de magnétomètre et de gyromètre triaxiaux, à ceux issus de la *MTi-G* qui fait intervenir en plus une information GPS dans la structure de son algorithme. De même, nous comparons les performances de nos approches à des méthodes développées en *Bio-logging* afin d'examiner l'apport de notre contribution au niveau de la précision du calcul de l'attitude et des accélérations propres au cours du mouvement des animaux.

Le **cinquième chapitre** constitue une «pré-perspective» au travail développé et présenté dans ce livre. Nous nous intéressons à la navigation à l'estime, une technique qui permet de remonter à la position d'un mobile depuis sa dernière position. Nous présentons ainsi une approche préliminaire qui permet de reconstruire les déplacements 3D lors de la marche chez un sujet humain. Notre vision à court terme est de développer et de transposer cette méthode vers une application sur l'animal afin de reconstituer son parcours 3D. Une centrale d'attitude attachée au pied d'un sujet humain nous permet d'estimer dans un premier temps la variation de l'attitude puis de l'exploiter pour calculer les accélérations propres. A l'aide d'une technique de double intégrations de cette accélération ainsi qu'une technique de recalage de la vitesse linéaire issue de la navigation pédestre, nous remontons finalement à la position estimée. Nous réalisons à la fin un essai expérimental en suivant un chemin réel et connu afin de conclure quant à la fiabilité de la méthode proposée pour le calcul de la position.

Enfin, une conclusion générale résume nos principaux apports et ouvre quelques perspectives à ce travail. Finalement, une bibliographie et diverses annexes clôturent ce livre.

Chapitre 1

Outils nécessaires à l'estimation de l'attitude d'un corps rigide

1.1. Introduction

Ce chapitre introductif présente les différents outils mathématiques nécessaires à l'estimation de l'attitude d'un corps rigide. Il se décline en quatre parties qui peuvent paraître indépendantes mais constituent un tout permettant d'appréhender la suite de ce livre aussi bien pour les spécialistes que pour les personnes non familiarisées avec ce domaine d'étude. Le lecteur pourra consulter les références présentes tout le long de ce chapitre pour avoir plus de détails sur chaque notion présentée.

La première partie de ce chapitre introduit la notion de l'attitude d'un corps rigide. Elle constitue la problématique principale de ce travail. Ensuite, nous présentons les principaux repères utilisés pour exprimer la variation de l'attitude. Par la suite, nous élaborons une synthèse des différentes formes de représentation de l'attitude existant dans la littérature. La seconde partie de ce chapitre est dédiée à la description des principaux capteurs couramment utilisés lors de l'estimation de l'attitude d'un corps rigide. La troisième partie de ce chapitre présente la technologie actuelle des MEMS utilisée dans les principaux capteurs d'attitude tels que les accéléromètres, les magnétomètres et les gyromètres. Ces types de capteurs seront retenus lors de notre application dédiée à la reconstruction de l'attitude de l'animal. Au cours de la quatrième et dernière partie, nous définissons les principes de fonctionnement des différents systèmes inertiels utilisant principalement les capteurs présentés dans la partie précédente. Les notations définies dans cette partie seront utilisées par la suite tout le long des chapitres du livre.

Nous rappelons que pour alléger la lecture du chapitre, certains aspects techniques seront détaillés en annexe. Ceci sera précisé au fur et à mesure dans la suite du texte.

1.2. Définitions et notations

1.2.1. Définition d'un corps rigide

En physique, un corps rigide est considéré comme un solide de taille finie formé d'un ensemble de points matériels de volume indéformable (Goldstein, 1980). Autrement dit, la distance entre n'importe quelle paire de points donnés de ce corps reste constante au cours du temps indépendamment du type de mouvement et des forces externes exercées, comme l'indique la figure 1.1.

Bien qu'un tel objet ne puisse pas physiquement exister en raison de la relativité, les objets peuvent normalement être considérés parfaitement rigides s'ils ne se déplacent pas à une vitesse proche de celle de la lumière. Le mouvement d'un corps rigide est caractérisé par deux variables spatiales, une liée à sa position linéaire et l'autre à sa position angulaire appelée encore attitude ou orientation (Baraff, 1997).

1.2.2. Attitude d'un corps rigide

L'attitude d'un corps rigide représente la manière dont il est disposé dans l'espace, indépendamment de la position de son centre d'inertie. Généralement, l'attitude d'un corps rigide représente la direction de ses axes principaux par rapport à un trièdre de référence et sa dynamique exprime les changements d'orientation de l'objet.

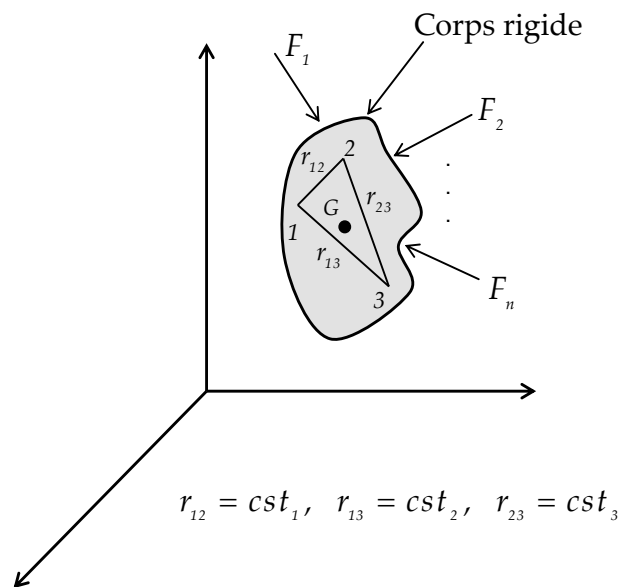


Fig. 1.1. Représentation schématique d'un corps rigide

1.2.3. Les systèmes de coordonnées nécessaires à la représentation de l'attitude

Afin d'étudier le mouvement et l'attitude d'un corps rigide dans l'espace, deux principaux systèmes de coordonnées sont nécessaires : le système de coordonnées mobiles associé à l'objet et le système de coordonnées locales fixes. Une étude plus générale des différents repères utilisés en navigation est présentée en annexe A.1.

1.2.3.1. Système de coordonnées mobiles

Ce système de coordonnées mobiles (B), lié à la structure du corps rigide (Body frame), est composé de trois axes orthonormés (X_B, Y_B, Z_B) comme l'illustre la figure 1.2. L'origine de ce système de coordonnées et la direction de ses axes sont choisis de telle sorte qu'ils coïncident, respectivement, avec le centre de gravité du corps considéré et ses principaux axes d'inertie (Farrell et Barth, 1998 ; Grewal *et al.*, 2001).

1.2.3.2. Système de coordonnées fixes

Plusieurs systèmes de références sont utilisés dans le cadre de la navigation. Le système le plus souvent utilisé lors de l'analyse du mouvement et de l'attitude est le système de navigation fixe (N), appelé encore (**LTP**²) (Farrell, 2008 ; Titterton et Weston, 2004). Ce repère est composé de trois axes orthogonaux (X_N, Y_N, Z_N) et son origine est commune au système fixé au corps rigide comme c'est indiqué dans la figure 1.2. Deux de ses axes forment un plan tangent local à l'ellipsoïde terrestre. Ce système de coordonnées se décline selon deux modalités par rapport au géoïde terrestre (Nord et gravité).

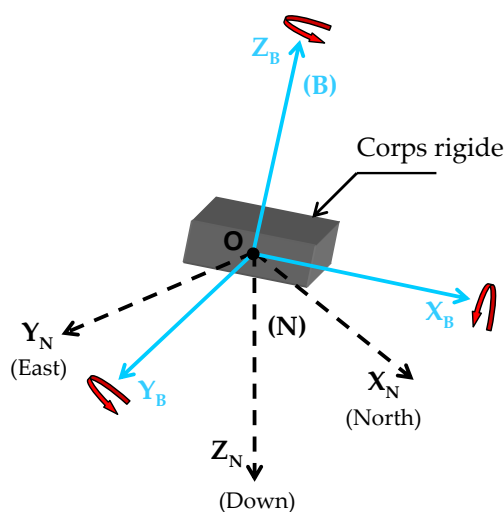


Fig. 1.2. Les systèmes de coordonnées mobiles (B) et fixes (N)

On distingue ainsi les conventions **NED**³ et **ENU**⁴, définies de la façon suivante :

- **NED** : Selon cette convention, les axes X_N , Y_N , et Z_N du système (N) coïncident, respectivement, avec les directions Nord magnétique local, Est, et pesanteur.
- **ENU** : Cette convention ressemble à celle du système NED avec une différence au niveau du troisième axe, dirigé dans le sens opposé à celui de la pesanteur.

² **LTP** : Local Tangent Plane

³ **NED** : North-East-Down

⁴ **ENU** : East-North-Up

Nous retenons pour la suite la convention NED représentée dans la figure 1.3. Ce système de coordonnées a été choisi au lieu de la représentation ENU puisque l'axe Z_N et le vecteur gravité auront la même direction. Notons que l'attitude estimée lors des simulations théoriques et des évaluations expérimentales, sujet des chapitres 3 et 4, sera exprimée par rapport à ce système de coordonnées.

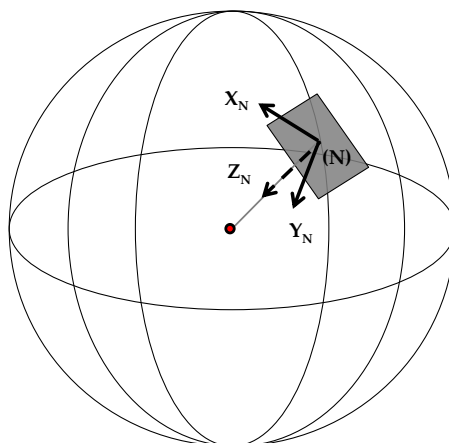


Fig. 1.3. Le système de coordonnées fixes (N) lié à la terre et défini selon la convention NED

1.2.4. Les formes de représentation de l'attitude

Afin d'être capable de transformer les vecteurs entre les deux systèmes de coordonnées (N) et (B) ou d'exprimer l'attitude dans un système pertinent, des techniques de passage et de transformation sont nécessaires. Plusieurs représentations de l'attitude ont été proposées dans la littérature telles que *les matrices de rotations*, *les quaternions*, *les angles d'Euler* et *les paramètres de Rodrigues*. Ces représentations sont inspirées du théorème d'Euler (Fossen, 1994).

Une étude plus détaillée des différentes formes mathématiques de représentation de l'attitude est présentée dans (Shuster, 1993 ; Phillips *et al.*, 2001). Néanmoins, nous donnerons par la suite quelques définitions et notions mathématiques basiques de chaque représentation. Le but est de retenir une forme d'attitude appropriée avec l'ensemble des contraintes et besoins liés à l'application au *Bio-logging* considérée.

1.2.4.1. Les matrices de rotations

♦ Définition

Une matrice de rotation permet d'identifier l'orientation de tout système de coordonnées dans les trois dimensions de l'espace, par exemple le système mobile (B) par rapport au système de navigation fixe (N).

Cette matrice permet de transformer tout vecteur du référentiel de navigation au référentiel mobile (lié à l'objet) et vice versa. Elle est appelée aussi matrice de passage ou

encore matrice d'attitude. Une étude détaillée des matrices de rotations ainsi que leurs propriétés a été proposée par (Farrell et Barth, 1998 ; Spong *et al.*, 2005).

♦ Propriétés essentielles des matrices de rotations

Soient \vec{x} et \vec{y} les coordonnées d'un même vecteur exprimées, respectivement, dans (N) et (B) . Le vecteur \vec{y} peut être écrit en fonction du vecteur \vec{x} . Ainsi, les coordonnées de \vec{x} et \vec{y} sont reliées au moyen d'une transformation linéaire qui peut être énoncée de la manière suivante :

$$\vec{y} = M_N^B \vec{x} \quad (1.1)$$

La matrice M_N^B appartient au sous-espace des matrices orthogonales, appelé groupe orthogonal spécial (espace compact borné), dénoté par $SO(3)$ et défini par :

$$SO(3) = \left\{ M_N^B / M_N^B \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, (M_N^B)^T M_N^B = I_{3 \times 3}, \det(M_N^B) = 1 \right\} \quad (1.2)$$

Ainsi, cette matrice de rotation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$M_N^B = \left((M_N^B)_1 \quad (M_N^B)_2 \quad (M_N^B)_3 \right) \quad (1.3)$$

avec

$$(M_N^B)_1 = \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ M_{31} \end{bmatrix} ; (M_N^B)_2 = \begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{22} \\ M_{32} \end{bmatrix} ; (M_N^B)_3 = \begin{bmatrix} M_{13} \\ M_{23} \\ M_{33} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

L'orthogonalité de la matrice M_N^B impose que celle-ci satisfasse la condition suivante :

$$(M_N^B)^T = (M_N^B)^{-1} \quad (1.5)$$

La matrice d'attitude M_N^B est définie par :

$$M_N^B = \begin{bmatrix} i^B \cdot j^N & i^B \cdot j^N & i^B \cdot k^N \\ j^B \cdot i^N & j^B \cdot j^N & j^B \cdot k^N \\ k^B \cdot i^N & k^B \cdot j^N & k^B \cdot k^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) & \cos(\beta_1) & \cos(\gamma_1) \\ \cos(\alpha_2) & \cos(\beta_2) & \cos(\gamma_2) \\ \cos(\alpha_3) & \cos(\beta_3) & \cos(\gamma_3) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

avec i , j , et k sont des vecteurs unitaires orthogonaux et l'opérateur (\cdot) dans (1.6) exprime un produit vectoriel. Cette matrice orthogonale est constituée des cosinus

directeurs des angles α_i , β_i , et γ_i existant entre les axes des deux systèmes de coordonnées, d'où son appellation encore *Matrice de cosinus directeur* (**DCM**⁵) (Farrell, 2008 ; Wertz, 2002). L'orthogonalité de cette matrice impose des contraintes laissant trois de ses neuf composantes indépendantes (Wertz, 2002).

♦ Equation cinématique correspondante

Dans le cas où le système de coordonnées mobiles (B) (lié au corps rigide) tourne par rapport au système de coordonnées fixes (N) avec une vitesse angulaire $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$, la matrice de rotation M_N^B varie au cours du temps. Cela se traduit par une relation linéaire (équation différentielle) entre la matrice de rotation et la vitesse angulaire ω , dénommée *équation cinématique* (Phillips et al., 2001):

$$\dot{M}_N^B(t) = [\omega^\times] M_N^B \quad (1.7)$$

Dans cette équation, $[\omega^\times]$ est le tenseur antisymétrique associé à la vitesse angulaire ω dont la définition a été définie dans (Phillips et al., 2001) par :

$$[\omega^\times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

1.2.4.2. Les quaternions

♦ Définition

L'approche par les quaternions permet de représenter efficacement l'attitude d'un objet et de formuler la composition de ses rotations 3D. Cette représentation, appelée aussi paramètre symétrique d'Euler, a été mise en forme par William Rowan Hamilton en 1843 (Frey et Crassin, 2003).

Le quaternion est un nombre hypercomplexe de dimension 4. Il est composé d'un scalaire et d'un vecteur unité imaginaire. Il peut ainsi être défini de manière exacte par une seule combinaison linéaire (Kuipers, 1999) :

$$q = q_0 + q_{vect} = q_0 1 + q_1 i + q_2 j + q_3 k \quad (1.9)$$

avec q_0 , q_1 , q_2 , et q_3 sont des nombres réels et i , j , et k sont des coefficients imaginaires satisfaisant les conditions suivantes :

⁵ **DCM** : Direction Cosine Matrix

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \quad (1.10)$$

$$ij = -ji = k \quad (1.11)$$

$$jk = -kj = i \quad (1.12)$$

$$ki = -ik = j \quad (1.13)$$

L'élément scalaire et le vecteur imaginaire du quaternion sont représentés, respectivement, par q_0 et $q_{vect} = q_1 i + q_2 j + q_3 k$.

♦ Propriétés essentielles des quaternions

Nous pouvons représenter toutes les attitudes par des quaternions unitaires satisfaisant la condition suivante :

$$|q| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} = 1 \quad (1.14)$$

L'espace vectoriel des quaternions H sur le corps des réels est un espace vectoriel réel de dimension 4 rapporté à une base notée $(1, i, j, k)$. Cet espace est défini par :

$$H = \left\{ q / q^T q = 1, q = \begin{bmatrix} q_0 & q_{vect}^T \end{bmatrix}^T, q_0 \in \mathbb{R}, q_{vect} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1} \right\} \quad (1.15)$$

L'utilisation des quaternions pour représenter les rotations résulte finalement de l'observation du fait que n'importe quelle rotation entre deux systèmes de coordonnées peut être reformulée comme la simple rotation d'un angle θ autour d'un axe unitaire $\bar{u} = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \end{bmatrix}^T$ (axe d'Euler). Ainsi, un quaternion satisfait la forme suivante :

$$q = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & u_x \sin \frac{\theta}{2} & u_y \sin \frac{\theta}{2} & u_z \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} q_0 & q_1 & q_2 & q_3 \end{bmatrix}^T \quad (1.16)$$

Le principe physique d'un quaternion unitaire, défini dans (1.16), est représenté dans la figure 1.4. Cette figure illustre la manière avec laquelle un quaternion permet de décrire le passage entre deux vecteurs en utilisant uniquement un axe de rotation et un angle de rotation θ .

Au cours de la rotation, les points P_1 , P_2 et P_3 sont situés sur le même plan de rotation et à une même distance par rapport à l'axe de rotation. Ainsi, le point P_1 est transformé en P_3 via P_2 s'il se déplace en ligne droite tout en passant par un point distant de $(\sin \theta/2)$ de l'axe de rotation et distant de $(\cos \theta/2)$ des points P_1 et P_3 .

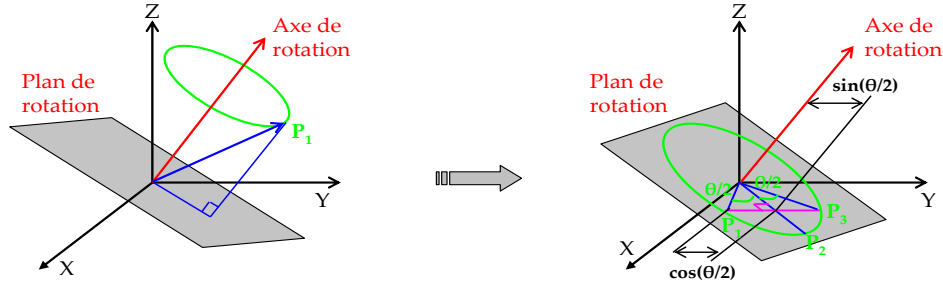


Fig. 1.4. Représentation graphique d'un quaternion unitaire

L'élément identité dans l'algèbre des quaternions est défini par :

$$q_{id} = \begin{bmatrix} 1 & 0^T \end{bmatrix}^T \quad (1.17)$$

Le produit de deux quaternions $q_a = \begin{bmatrix} q_{a0} & q_{a,vect}^T \end{bmatrix}^T$ et $q_b = \begin{bmatrix} q_{b0} & q_{b,vect}^T \end{bmatrix}^T$ n'est pas commutatif. Il peut être défini de la façon suivante (Chou, 1992) :

$$q_a \otimes q_b = \begin{bmatrix} q_{a0} & q_{a,vect}^T \\ q_{a,vect} & I_{3 \times 3} q_{a0} + [q_{a,vect}^\times] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{b0} \\ q_{b,vect} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

où $I_{3 \times 3}$ représente la matrice identité et $[q_{a,vect}^\times]$ dénote le tenseur antisymétrique associé au vecteur $q_{a,vect}$ (Phillips *et al.*, 2001) :

$$[q_{a,vect}^\times] = \begin{bmatrix} 0 & -q_{a3} & q_{a2} \\ q_{a3} & 0 & -q_{a1} \\ -q_{a2} & q_{a1} & 0 \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Toute rotation vectorielle dans l'espace peut être effectuée en utilisant l'algèbre des quaternions. Cette rotation est réalisée de deux façons en utilisant *le produit de quaternion* ou *la multiplication par la matrice de rotation*.

- Rotation vectorielle à l'aide d'un produit de quaternion

Nous considérons un vecteur quelconque $\vec{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ exprimé dans le système de navigation fixe (N). Son quaternion pur associé s'écrit comme suit (Kuipers, 1999) :

$$x_q = \begin{bmatrix} 0 & \vec{x}^T \end{bmatrix}^T \quad (1.20)$$

Ainsi, la rotation de \vec{x} du référentiel (N) au référentiel (B) peut être accomplie à l'aide de deux multiplications de quaternions :

$$y_q = q \otimes x_q \otimes q^{-1} \quad (1.21)$$

tel que :

$$y_q = \begin{bmatrix} 0 & \vec{y}^T \end{bmatrix}^T \quad (1.22)$$

où $\vec{y} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ est le vecteur associé au quaternion pur y_q , exprimé dans le système de coordonnées mobiles (B) lié au corps rigide. Notons que q^{-1} est le quaternion inverse de q et puisque nous manipulons des quaternions unitaires alors :

$$q^{-1} = \bar{q} = [q_0 \quad -q_1 \quad -q_2 \quad -q_3]^T \quad (1.23)$$

où \bar{q} est le quaternion conjugué de q .

- Rotation vectorielle à l'aide d'une multiplication par la matrice de rotation

La rotation vectorielle dans l'espace des quaternions peut être définie par :

$$\vec{y} = M_N^B(q) \vec{x} \quad (1.24)$$

où $M_N^B(q)$ est la matrice de rotation exprimée en termes de quaternion par :

$$M_N^B(q) = (q_0^2 - q_{vect}^T q_{vect}) I_{3 \times 3} + 2(q_{vect} q_{vect}^T - q_0 [q_{vect}^\times]) \quad (1.25)$$

Finalement, $M_N^B(q)$ s'écrit :

$$M_N^B(q) = \begin{bmatrix} 2(q_0^2 + q_1^2) - 1 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_0^2 + q_2^2) - 1 & 2(q_0 q_1 + q_2 q_3) \\ 2(q_0 q_2 + q_1 q_3) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & 2(q_0^2 + q_3^2) - 1 \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Remarque 1.1. En termes d'attitude, les quaternions q et $(-q)$ sont identiques puisque $M_N^B(q) = M_N^B(-q)$. En effet, si le quaternion q est utilisé pour effectuer une rotation avec un angle θ autour de \vec{u} , alors le quaternion $(-q)$ effectue la rotation avec un angle de $2\pi - \theta$ autour de \vec{u} .

Remarque 1.2. La norme unitaire du quaternion permet de préserver facilement l'orthogonalité de la matrice de rotation $M_N^B(q)$.

♦ Equation cinématique correspondante

L'équation cinématique (1.7) peut être représentée en termes de quaternion par la formule suivante (Kuipers, 1999 ; Phillips *et al.*, 2001) :

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_{vect}^T \\ I_{3 \times 3} q_0 + [q_{vect}^\times] \end{bmatrix} \omega \quad (1.27)$$

$[q_{vect}^\times]$ est défini dans (1.19) et $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ est la vitesse angulaire du corps rigide exprimée dans le système de coordonnées mobiles (B) par rapport au système de coordonnées fixes (N).

Un excellent aperçu de l'algèbre des quaternions est donné dans (Baker, 1911 ; Conway et Smith, 2001 ; Kuipers, 1999).

1.2.4.3. Les angles d'Euler

♦ Définition

Les angles d'Euler ont été développés par Leonhard Paul Euler (1707-1783) pour décrire l'orientation d'un corps rigide dans l'espace Euclidien à 3 dimensions. Pour donner une orientation spécifique à tout objet dans un système de coordonnées, il est possible de décomposer son orientation par 3 rotations unitaires et successives décrites par les angles d'Euler. Chaque rotation est effectuée à chaque étape autour d'un seul axe du système de coordonnées référant (Titterton et Weston, 2004).

♦ Propriétés essentielles des angles d'Euler

En utilisant les angles d'Euler, le passage d'un système de coordonnées fixes $N(X_N, Y_N, Z_N)$ à un système de coordonnées mobiles $B(X_B, Y_B, Z_B)$ s'effectue à l'aide de 3 rotations successives en utilisant par exemple la convention ZXZ (Figure 1.5) :

R_1 . La précession ψ autour de l'axe Z_N , qui fait passer du système de coordonnées fixes $N(X_N, Y_N, Z_N)$ à (U, V, Z_N) .

R_2 . La nutation θ autour de l'axe U , qui fait passer de (U, V, Z_N) à (U, W, Z') .

R_3 . Enfin la rotation propre ϕ autour de Z' , qui fait passer de (U, W, Z') au système de coordonnées mobiles $B(X_B, Y_B, Z_B)$.

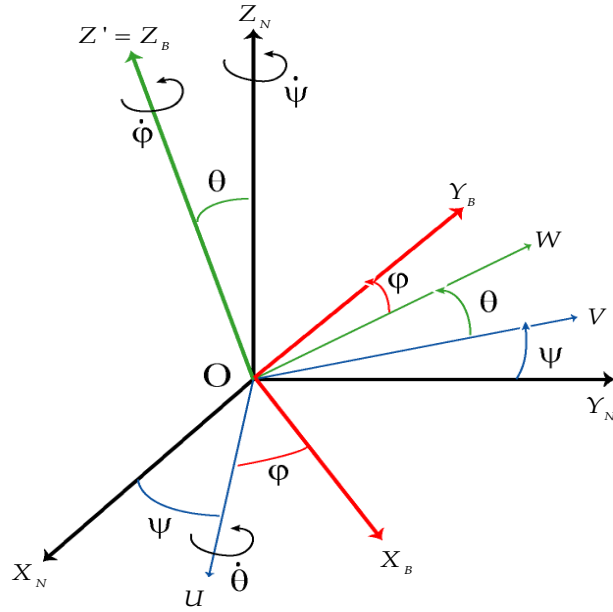


Fig. 1.5. Les trois rotations successives décrites par les angles d'Euler

Il existe finalement 12 conventions possibles relatives aux séquences d'Euler. Les cinq premières conventions sont similaires à celle proposée ci-dessus, en (ZXZ). Elles sont obtenues en choisissant des axes différents (ZYZ, XYX, XZX, YZY, YXY). Ainsi, il existe 6 combinaisons possibles de ce type et toutes se comportent d'une façon identique. Le deuxième type de convention utilise trois matrices de rotations ayant chacune un axe de rotation différent.

Il y a aussi six possibilités de ce type (XYZ, XZY, ZXY, ZYX, YZX, YXZ). Elles se comportent de façon légèrement différente. Cette seconde convention est appelée parfois (en robotique et aéronautique) *angles nautiques*, *angles de Tait-Bryan* ou *angles de Cardan (Roulis-Tangage-Lacet)* (Goldstein, 1980). Par exemple, lors de la séquence ZYX, le passage du système de coordonnées fixes $N(X_N, Y_N, Z_N)$ au système de coordonnées mobiles $B(X_B, Y_B, Z_B)$ s'effectue en faisant les 3 rotations successives suivantes (Figure 1.6) :

R₁. Une rotation $\psi \in [-\pi, \pi]$ autour de l'axe Z_N par un angle de lacet (*Yaw angle*).

R₂. Une rotation $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ autour du nouvel axe Y_N (après avoir effectué la rotation **R₁**) par un angle de tangage (*Pitch angle*).

R₃. Une rotation $\phi \in [-\pi, \pi]$ autour du nouvel axe X_N (après avoir effectué les rotations **R₁** et **R₂**) par un angle de roulis (*Roll angle*).

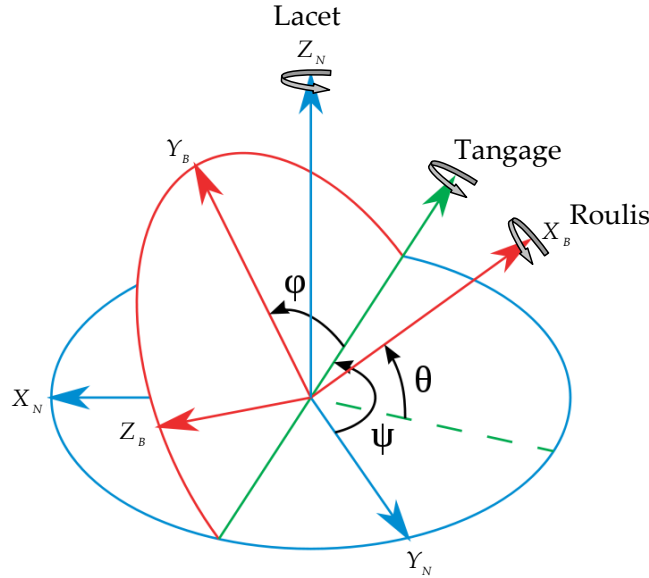


Fig. 1.6. Les trois rotations successives décrites par les angles de Cardan (Roullis, Tangage, Lacet)

Remarque 1.3. La séquence inverse XYZ permet de passer du système de coordonnées mobiles $B(X_B, Y_B, Z_B)$ au système de coordonnées fixes $N(X_N, Y_N, Z_N)$.

Les matrices de rotations qui représentent chaque rotation sont données par :

$$M_{Z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_{Y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad M_{X,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

Ainsi, la matrice de rotation M_N^B qui décrit le passage de (N) à (B) pour la séquence de rotation ZYX est déterminée par (Wertz, 2002) :

$$M_N^B(\phi, \theta, \psi) = M_{X,\phi} M_{Y,\theta} M_{Z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & -s\theta \\ -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & c\theta s\phi \\ s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

où $\cos(x)$ et $\sin(x)$ sont notés cx et sx , respectivement, avec $x = \theta$ ou $x = \phi$ ou $x = \psi$.

La matrice de rotation M_B^N qui décrit le passage de (B) à (N) pour la séquence de rotation XYZ est déterminée par : $M_B^N = (M_N^B)^T$.

Remarque 1.4. Puisque la matrice de rotation M_N^B , définie dans (1.29), appartient au sous-espace $SO(3)$, il est facile de vérifier que : $(M_N^B)^{-1} = (M_N^B)^T$.

♦ Equation cinématique correspondante

L'équation cinématique écrite en termes d'angles d'Euler est définie par (Phillips *et al.*, 2001) :

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta \sin \varphi & \tan \theta \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi / \cos \theta & \cos \varphi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

où $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ est la vitesse angulaire du corps rigide dans le système de coordonnées mobiles (B) par rapport au système de coordonnées fixes (N).

1.2.4.4. Les paramètres de Rodrigues

♦ Définition

Les paramètres de Rodrigues sont obtenus à partir du théorème de rotation d'Euler. Ils peuvent être utilisés afin d'éliminer la contrainte de normalité associée au quaternion. Cette représentation est aussi connue dans la littérature comme le vecteur de Gibbs et peut être exprimée en fonction de l'axe d'Euler \hat{e} et de l'angle d'Euler ζ comme suit (Guerrero-Castellanos, 2008) :

$$\vec{r} = \frac{1}{q_0} q_{vect} = \hat{e} \tan\left(\frac{\zeta}{2}\right) \quad (1.31)$$

Le vecteur de Gibbs est de dimension 3 et peut être défini par :

$$\vec{r} = [r_1 \ r_2 \ r_3]^T \quad (1.32)$$

♦ Propriétés essentielles des paramètres de Rodrigues

La matrice de rotation M_N^B peut être définie en termes de paramètres de Rodrigues par (Schaub et Junkins, 1996) :

$$M_N^B(\vec{r}) = \frac{2}{\vec{r}^T \vec{r} + 1} \left((1 - \vec{r}^T \vec{r}) I_{3 \times 3} + 2 \vec{r} \vec{r}^T - 2 [\vec{r}^\times] \right) \quad (1.33)$$

où $[\vec{r}^\times]$ est le tenseur antisymétrique défini dans (1.19).

Finalement, la matrice de rotation $M_N^B(\vec{r})$ peut prendre la forme suivante :

$$M_N^B(\vec{r}) = \frac{1}{1 + r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} \begin{bmatrix} 1 + r_1^2 - r_2^2 - r_3^2 & 2(r_1 r_2 + r_3) & 2(r_1 r_3 - r_2) \\ 2(r_2 r_1 - r_3) & 1 - r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 & 2(r_2 r_3 + r_1) \\ 2(r_1 r_3 + r_2) & 2(r_2 r_3 - r_1) & 1 - r_1^2 - r_2^2 + r_3^2 \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

A partir de l'équation (1.31), nous pouvons remarquer que le vecteur de Gibbs est utilisé pour effectuer une rotation autour de l'axe \hat{e} à condition que $\zeta \neq \pm\pi$ (existence de singularités à $\pm\pi$ (lorsque $q_0 = 0$)) (Schaub et Junkins, 1996).

♦ Equation cinématique correspondante

L'équation cinématique en termes de paramètres de Rodrigues peut prendre la forme suivante (Guerrero-Castellanos, 2008) :

$$\dot{r}_1 = \frac{1}{2} \left(\omega_1 - \omega_2 r_3 + \omega_3 r_2 + r_1 \sum_{i=1}^3 r_i \omega_i \right) \quad (1.35)$$

$$\dot{r}_2 = \frac{1}{2} \left(\omega_2 - \omega_3 r_1 + \omega_1 r_3 + r_2 \sum_{i=1}^3 r_i \omega_i \right) \quad (1.36)$$

$$\dot{r}_3 = \frac{1}{2} \left(\omega_3 - \omega_1 r_2 + \omega_2 r_1 + r_3 \sum_{i=1}^3 r_i \omega_i \right) \quad (1.37)$$

où r_i sont les paramètres de Rodrigues et ω_i les composantes du vecteur vitesse angulaire.

Lors de la présentation des paramètres de Rodrigues, nous avons observé une singularité pour $\zeta = \pm\pi$, ce qui laisse le vecteur de Gibbs \vec{r} indéfini. Pour remédier à ce problème, une possibilité est d'utiliser un autre paramètre, appelé paramètre de Rodrigues modifié défini dans (Marandi et Modi, 1987) (voir annexe A.2).

1.2.5. Représentation de l'attitude : Analyse et choix

Dans ce paragraphe, nous analysons les différentes propriétés mathématiques des formes de représentation de l'attitude mentionnées précédemment et représentées par :

- Les matrices de rotations
- Les quaternions
- Les angles d'Euler (ou angles de Cardan)
- Les paramètres de Rodrigues
- Les paramètres de Rodrigues modifiés

Cette analyse est synthétisée dans le tableau 1.1 en regroupant les avantages et les inconvénients des différentes représentations de l'attitude dans le but de retenir la forme la plus appropriée à notre application au *Bio-logging*.

Souvent, le choix d'une représentation spécifique de l'attitude se fait en tenant compte de la nature de l'application envisagée et de ses contraintes imposées. Dans le cas de ce travail, la forme d'attitude choisie servira à décrire les mouvements et les orientations des animaux dans le cadre d'une application plus générale : le *Bio-logging*.

Formes de représentation	Notations	Caractéristiques (avantages et inconvénients)
Matrice de rotation	M_{ij}	<ul style="list-style-type: none"> • (+) La matrice de rotation M_{ij}, donnée par (1.6), ne comporte pas de fonctions trigonométriques. • (+) Les rotations composites sont directement obtenues à partir d'une multiplication matricielle standard. • (+) L'équation cinématique (1.7) associée à la matrice de rotation est linéaire. • (+) Absence de singularité géométrique. • (-) Neuf paramètres à estimer. • (-) Six paramètres redondants.
Quaternion	q	<ul style="list-style-type: none"> • (+) Quatre paramètres à estimer. • (+) Pas de fonctions trigonométriques. • (+) Les rotations composites sont directement obtenues à partir d'une multiplication de quaternion (facilité de combinaison de rotations). • (+) Linéarité de l'équation cinématique (1.27) associée à un quaternion. • (+) Absence de singularité géométrique. • (+) Un seul paramètre redondant. • (-) (q) et ($-q$) représentent la même attitude. • (-) Interprétation physique peu intuitive des rotations dans l'espace.
Angles d'Euler (Angles de Cardan)	φ, θ, ψ	<ul style="list-style-type: none"> • (+) Trois paramètres à estimer. • (+) Interprétation physique intuitive des rotations dans l'espace. • (+) Absence de paramètres redondants. • (-) Les rotations composites sont difficiles à exprimer en

		<p>fonction des angles d'Euler.</p> <ul style="list-style-type: none"> • (-) Non linéarité de l'équation cinématique (1.30) associée aux angles d'Euler. • (-) Présence de fonctions trigonométriques. • (-) Singularité de l'équation cinématique correspondante lorsque le tangage atteint $\theta = \pm \pi/2$ (les axes du roulis et du lacet sont portés par la même direction). Ce problème est connu sous le nom <i>Gimbal lock</i> (Eck, 2001 ; Diebel, 2006) et engendre la perte d'un angle de liberté.
Paramètres de Rodrigues (modifiés)	\vec{r}, \vec{s}	<ul style="list-style-type: none"> • (+) Trois paramètres à estimer. • (+) Absence de paramètres redondants. • (+) Absence de fonctions trigonométriques. • (+) Les rotations composites sont directement obtenues à partir d'une formule spécifique. • (-) Existence de singularités géométriques pour $\zeta = \pm \pi$ (pour les paramètres de Rodrigues) et $\zeta = \pm 2\pi$ (pour les paramètres de Rodrigues modifiés).

Tab. 1.1. Synthèse des principales caractéristiques de chaque représentation de l'attitude

Ainsi, nous récapitulons à travers les deux points suivants l'ensemble des besoins à satisfaire lors de l'estimation de l'attitude dans un tel domaine et qui nous permettront par la suite de choisir la forme de l'attitude la plus convenable.

- Les rotations du corps de l'animal lors de son mouvement sont libres dans tout l'espace 3D. Son corps peut donc évoluer dans toutes les orientations possibles. Ainsi, ceci nous impose de choisir une représentation de l'attitude capable de décrire le mouvement réalisé par l'animal sans aucune contrainte géométrique. Dans d'autres cas, en robotique aérienne ou terrestre par exemple, le corps en mouvement évolue dans un intervalle d'orientation plus limité où le problème des singularités est écarté (l'angle de tangage ne dépasse pas $\pm \pi/2$ par exemple).
- Le but final du projet *NaviMeles* (c.f. chapitre 2, paragraphe 2.3) est de concevoir un système électronique autonome permettant de reconstituer toutes les orientations de l'animal pendant ses déplacements quotidiens. Ce système sera attaché à son corps et le suivra dans tous ses mouvements. Les algorithmes d'estimation de l'attitude de l'animal qui sont développés pourront être embarqués dans une étape finale sur le processeur de ce système électronique et seront exécutés en temps réel. Ainsi, le choix d'une forme d'attitude doit tenir compte de plusieurs critères tels que le coût de calcul, la stabilité numérique, la taille de mémoire du processeur, etc. Cela peut être extrêmement important, notamment pour alléger les structures d'algorithmes

d'estimation de l'attitude proposées et également dans la gestion de la consommation d'énergie du processeur.

♦ Choix de la représentation de l'attitude appropriée

En faisant le lien entre les propres suggestions de notre application et le tableau 1.1, l'approche par les quaternions nous paraît plus appropriée que celle utilisant les matrices de rotations, les angles d'Euler ou les paramètres de Rodrigues. En effet, l'analyse rapide du tableau 1.1 montre que les quaternions peuvent satisfaire en même temps l'ensemble des demandes des biologistes.

Le quaternion permet de résoudre le problème de singularités géométriques présent dans certaines représentations. Ainsi, il est possible de décrire toutes les attitudes de l'animal sans aucune discontinuité dans le calcul. De même, le quaternion est un outil mathématique qui assure un bon compromis pour satisfaire les critères demandés dans notre application au *Bio-logging* à savoir le coût de calcul léger, la stabilité numérique de l'algorithme d'estimation de l'attitude, la taille faible de mémoire du processeur, etc. Ces critères sont justifiés par le nombre minime de paramètres à estimer dans un quaternion (4 paramètres uniquement), la simplicité de l'équation cinématique associée (linéarité, absence de fonctions trigonométriques complexes, etc.), la facilité d'exprimer les rotations composites (transformations) entre les référentiels et le nombre faible d'opérations nécessaires aux combinaisons de rotations. Pour toutes ces raisons, les algorithmes développés par la suite pour l'estimation des mouvements et des attitudes seront entièrement basés sur l'utilisation de l'algèbre des quaternions.

Les quaternions qui seront estimés avec nos algorithmes lors des simulations théoriques et expérimentales sont à notre avis difficiles à interpréter mentalement en termes de rotation. Cependant, le passage vers les angles d'Euler (roulis, tangage et lacet) reste possible à l'aide des formules mathématiques classiques de transformation présentées en annexe D.1 et détaillées dans (Phillips *et al.*, 2001). Ainsi, le lecteur non familiarisé avec l'algèbre des quaternions pourra interpréter sans difficulté les résultats d'estimation obtenus.

1.3. Les principaux systèmes de perception proprioceptifs de l'attitude

Il existe aujourd'hui de nombreux capteurs destinés à la navigation et notamment à la mesure de l'attitude (orientation) de tout corps mobile. Dans ce paragraphe, nous ferons le tour des systèmes les plus utilisés dans l'estimation de l'attitude. Nous nous intéresserons essentiellement aux capteurs proprioceptifs qui fournissent des paramètres intrinsèques (internes) au comportement du corps mobile. Les informations sensorielles gérées dans ce cadre sont généralement des accélérations, des vitesses de giration et des angles d'attitude. Rappelons que d'autres types de capteurs extéroceptifs, permettant de localiser le mobile dans son milieu d'évolution, sont utilisés par fusion avec les capteurs proprioceptifs pour recalibrer la mesure de l'attitude. On distingue les systèmes

télémétriques, les systèmes optiques et la géo-localisation satellitaire (Drocourt, 2002). Ces outils ne sont pas abordés dans ce travail.

Une attention particulière sera donnée dans cette partie aux capteurs de types accéléromètre, magnétomètre et gyromètre. Nous utiliserons essentiellement les informations issues de ces capteurs dans les structures des estimateurs d'attitude proposées dans le chapitre 3.

1.3.1. Les accéléromètres

1.3.1.1. Définition et principe de mesure

Un accéléromètre mesure comme son nom l'indique l'accélération de l'objet qui le supporte suivant un, deux ou trois axes. Dans son principe physique, un accéléromètre peut être vu comme un corps d'épreuve de masse μ attachée à un ressort de raideur k (très grande) et que nous cherchons à maintenir en position. Dès qu'une force s'applique sur le boîtier de l'accéléromètre, l'accélération qui en résulte tend à mettre en mouvement le corps d'épreuve et à le déplacer de sa position initiale. La force à appliquer en retour pour maintenir le corps en place (par le ressort) fournit la lecture accélérométrique (Titterton et weston, 2004 ; Beeby *et al.*, 2004 ; Chehoi, 2005). La figure 1.7 montre le principe de fonctionnement d'un accéléromètre à un axe.

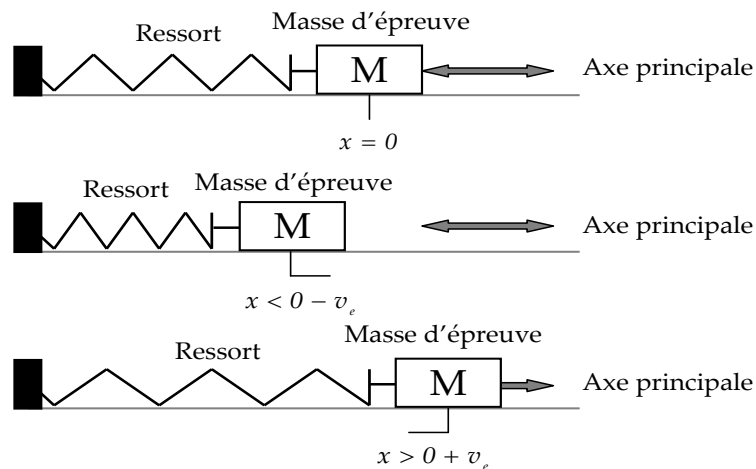


Fig. 1.7. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre

Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la deuxième loi fondamentale de la dynamique de Newton $F = \mu a$ (F : la force imprimée par le ressort, μ : la masse d'épreuve (kg) et a : l'accélération de l'objet mobile (m / s^2) ou la dérivée seconde de la position). L'interaction entre la force et l'accélération est réciproque. Puisque $F = -kx$, la connaissance du déplacement x de la masse attachée au ressort (ou encore la déformation engendrée par la force F) permet d'en déduire l'accélération par la relation $a = -kx/\mu$. Ce même système est utilisé lorsqu'il s'agit d'un accéléromètre à deux ou trois axes.

Ce type de capteur est caractérisé par plusieurs paramètres tels que : la plage de fonctionnement (exprimée en (m/s^2) ou (g) : la constante gravitationnelle universelle, $1g = 9.81m/s^2$), le nombre d'axes (un, deux ou trois axes), la bande passante (exprimée en (Hz)), la précision de la mesure effectuée, la résolution (exprimée en (g)), la sensibilité (la qualité de suivi des faibles variations de la grandeur d'entrée autour du point de mesure, exprimée en (V/g)), la gamme de température d'utilisation (exprimée en $(^{\circ}C)$), le choc maximum toléré (exprimé en (g)), la sensibilité transversale, la consommation, la technique de construction mécanique du capteur et l'électronique intégrée (Yazdi *et al.*, 1998). Ces paramètres déterminent les domaines d'applications associés à chaque type d'accéléromètre.

Dans la littérature, il existe différentes techniques pour mesurer le déplacement du corps d'épreuve ainsi que pour transformer l'action de l'accélération sur le capteur en signal électrique (Beeby *et al.*, 2004 ; Chehoi, 2005). Les principaux types de transducteurs qui peuvent être utilisés pour la construction des accéléromètres sont récapitulés dans le tableau 1.2.

Une étude détaillée de ces types de transducteurs, avec leurs avantages et inconvénients, existe dans (Beeby *et al.*, 2004 ; Chehoi, 2005). Notons que les trois premières approches sont les plus utilisées jusqu'à nos jours pour la fabrication des accéléromètres. Leurs principes de mesure sont schématisés dans la figure 1.8.

Types de transducteurs utilisés
Détection capacitive
Détection piézorésistive
Détection à base de piézojonction de transistor
Détection piézoélectrique
Détection à effet tunnel
Détection à structures résonantes
Détection optique
A poutre vibrante
Détection thermique

Tab. 1.2. Types de transductions utilisées dans un accéléromètre

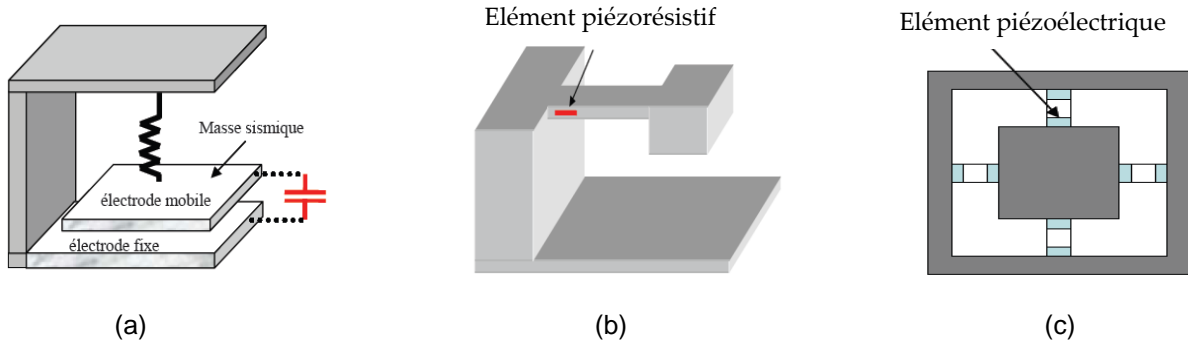


Fig. 1.8. Principes des accéléromètres - (a) à détection capacitive - (b) à détection piézorésistive - (c) à détection piézoélectrique

1.3.1.2. Modèle mathématique de mesure d'un accéléromètre

Si trois accéléromètres sont montés en triade orthogonale dans un corps rigide, tels que leurs axes sensibles coïncident avec les principaux axes d'inertie du corps mobile, la sortie de l'accéléromètre triaxial dans le système de coordonnées mobiles (B) est donnée par le vecteur de mesure suivant (Pflimlin, 2006) :

$$f = M_N^B(q)(a - G) + \delta_f \quad (1.38)$$

où $G = [0 \ 0 \ g]^T$ et $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ représentent, respectivement, le vecteur gravité et l'accélération propre du corps rigide, donnés dans le système de coordonnées fixes (N). $\delta_f \in \mathbb{R}^3$ est un vecteur de bruits supposés indépendants, blancs et gaussiens. $M_N^B(q)$ est la matrice de rotation (exprimée en termes de quaternion) définie dans (1.26) et traduisant le passage entre les systèmes de coordonnées fixes (N) et mobiles (B). Nous négligeons dans (1.38) la possibilité d'une mauvaise orthogonalité entre les trois axes du capteur.

1.3.2. Les inclinomètres

Un inclinomètre est un capteur servant à mesurer des angles par rapport à la ligne horizontale. La figure 1.9 présente quelques types d'inclinomètres utilisés de nos jours. Là où le niveau à bulle permet de détecter précisément où se situe l'horizontale, l'inclinomètre détermine en plus l'angle d'inclinaison par rapport à cette horizontale. Un inclinomètre est caractérisé généralement par sa sensibilité transversale (la sensibilité transverse quantifie le défaut d'alignement de l'axe de mesure réel par rapport à l'axe de mesure théorique) et son type de sortie (proportionnelle à l'angle/au sinus de l'angle).

Les inclinomètres se divisent en trois catégories selon la technologie utilisée. On distingue ainsi : l'inclinomètre à pendule simple, à pendule asservi et celui en silicium. Ces capteurs sont souvent utilisés en robotique et en navigation maritime.

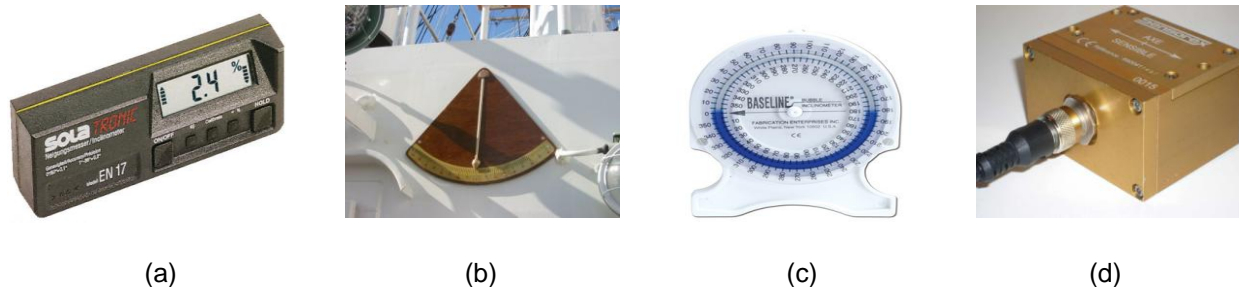


Fig. 1.9. Exemples de types d'inclinomètres

1.3.3. Les magnétomètres

1.3.3.1. Définition et principe de mesure

Un magnétomètre, appelé parfois compas magnétique, est un appareil permettant de mesurer la direction et l'intensité d'un champ magnétique et en particulier du champ magnétique terrestre, appelé aussi induction magnétique ou densité du flux de l'action magnétique du globe terrestre (Ripka, 2001 ; Gopel *et al.*, 1989).

Champ magnétique terrestre : La terre se caractérise par l'existence d'un champ magnétique constant qui s'est maintenu dans le temps et qui l'entoure de manière non circulaire. L'origine de ce champ est lié aux mouvements du fluide conducteur du noyau interne de la terre composé essentiellement de fer (Fe) et de Nickel (Ni). Ceux-ci sont engendrés par convection thermique et par rotation de la terre créant des courants électriques, et donnant ainsi naissance à un champ magnétique induit (Merrill *et al.*, 1996). Le champ d'induction, dit également champ de Gauss, est approximativement égal à celui d'un dipôle centré. Les lignes du champ magnétique, représentées dans la figure 1.10, se déplacent du pôle nord au pôle sud, comme celles du champ électrique qui vont d'une charge positive à une charge négative. Ce champ fluctue au cours du temps : sa direction et son intensité ne sont pas constantes. De plus, il n'est pas homogène en tout point du globe.

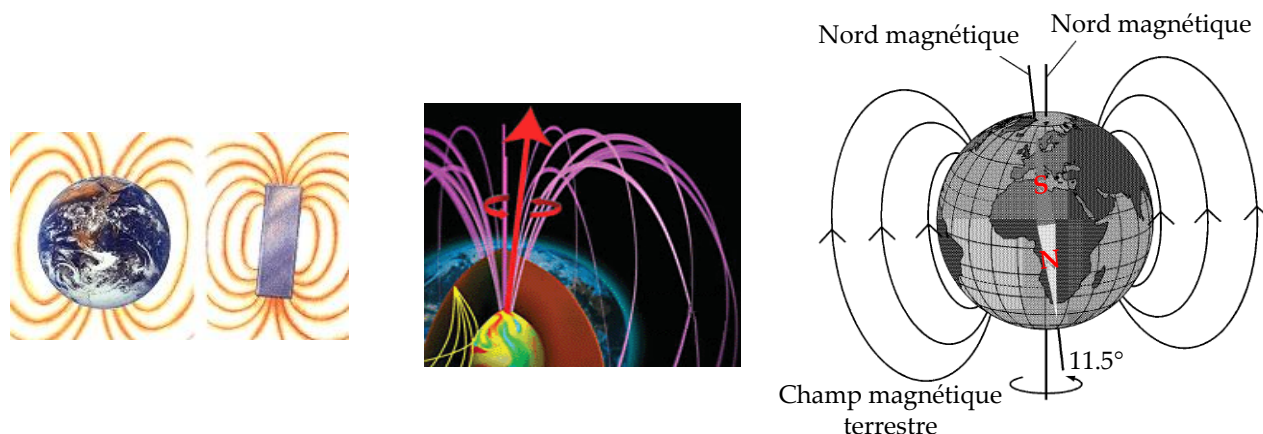


Fig. 1.10. Représentation des lignes du champ magnétique terrestre

Les unités les plus utilisées pour la mesure du champ magnétique terrestre sont le *Tesla* (T) et le *Gauss* (G), ($1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauss}$). Le champ magnétique terrestre varie généralement entre 0.7 G (aux deux pôles) et 0.25 G (à l'équateur). L'existence et la connaissance de ce champ nous permettent de s'orienter à l'aide d'une boussole lors de la navigation. De même, ce champ est utilisé par différentes espèces animales pour s'orienter dans leurs déplacements à grande distance. Cela est le cas par exemple de certains oiseaux migrateurs (pigeons), tortues marines ou poissons.

Vecteur champ magnétique terrestre : Afin de déterminer les différentes valeurs utiles à la navigation, une représentation tridimensionnelle du vecteur magnétique est nécessaire. En un point donné du champ magnétique terrestre, l'intensité de ce champ, notée \vec{H} , peut être décomposée en deux composantes vectorielles comme l'indique la figure 1.11 (a). La première composante est verticale \vec{H}_v (dirigée vers le centre de la terre) et la deuxième composante est horizontale \vec{H}_h (Ladetto, 2003). Aux pôles magnétiques la composante horizontale s'annule. L'angle formé par les vecteurs \vec{H} et \vec{H}_h (le plan horizontal ou l'équateur magnétique) est appelé inclinaison magnétique I (elle est positive vers le bas). Les pôles nord et sud magnétiques sont repérés, respectivement, par une inclinaison $I = 90^\circ$ et $I = -90^\circ$. L'angle D formé entre la direction du pôle nord géographique et du pôle nord magnétique est appelé déclinaison et fait environ 11.5° (Figures 1.10 et 1.11 (a)). L'azimut α , représenté dans la figure 1.11, est l'angle entre le nord magnétique (la direction de la composante horizontale du champ terrestre) et la direction de déplacement.

Des méthodes de représentation de l'intensité et de la direction du champ magnétique terrestre ont été proposées dans la littérature en se basant sur la géométrie sphérique et les séries de fonctions sphériques convergentes. Grâce à ces méthodes, une représentation réaliste de ce champ, notamment pour la navigation, a été établie en utilisant deux modèles numériques de référence tels que le champ Géomagnétique International de Référence (IGRF) (Astrosurf, 2010) et le Modèle Magnétique Mondial (WMM) (Macmillan et Maus, 2005). En utilisant les deux modèles numériques de référence, une expression simplifiée du champ magnétique, représentée par le vecteur m dans le système de coordonnées fixes $N(X_N, Y_N, Z_N)$, pourrait être proposée. Ce vecteur est schématisé dans la figure 1.11 (b) (Guerrero-Castellanos, 2008) :

$$m = [m_x \quad 0 \quad m_z]^T = [\|m\|\cos(I) \quad 0 \quad \|m\|\sin(I)]^T \quad (1.39)$$

En se basant sur le calculateur en ligne présenté dans (IGRF, 2010), nous donnons dans le tableau 1.3 l'intensité totale du champ magnétique $\|m\|$ et l'inclinaison I , calculées par exemple à Reims et Strasbourg en se basant sur les données de longitude et de latitude. Lors de notre application au *Bio-logging*, la zone d'action de l'animal et les

distances parcourues sont faibles pour observer une variation de la norme du champ magnétique terrestre $\|m\|$. Par conséquent, ce champ peut être considéré constant dans une zone donnée.

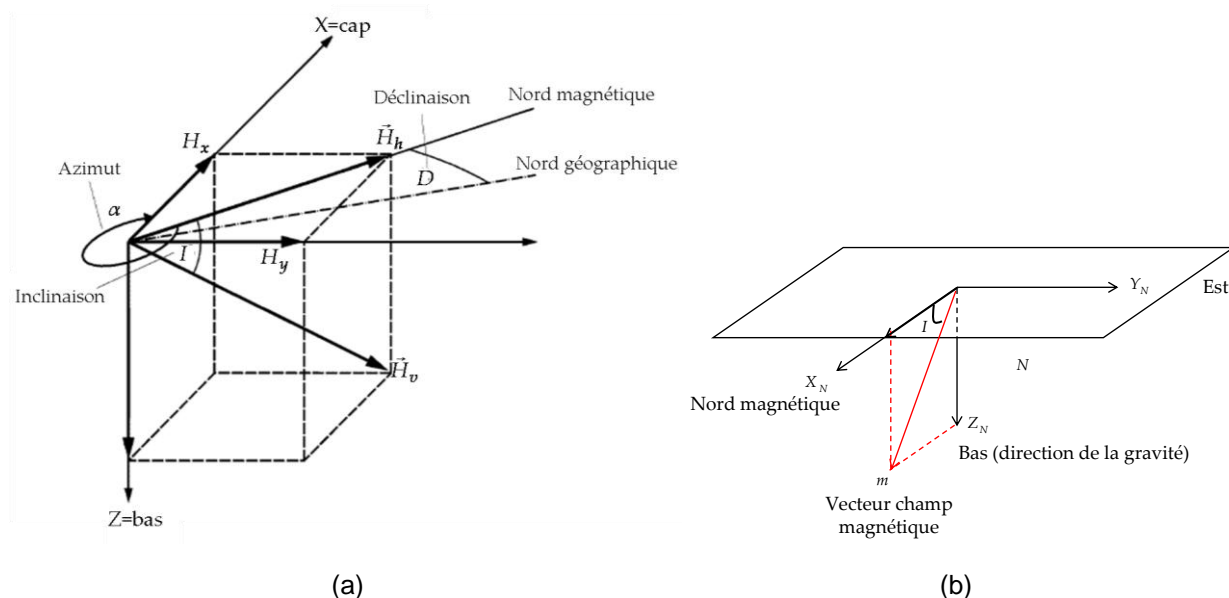


Fig. 1.11. (a) Représentation réelle du vecteur magnétique terrestre - (b) Représentation approchée du champ magnétique terrestre dans le système de coordonnées NED $N(X_N, Y_N, Z_N)$

Villes	Norme du champ magnétique $\ m\ $ (Gauss)	Inclinaison magnétique (°)
Reims (latitude : $49.26278^\circ N$, longitude : $4.03472^\circ E$)	0.48076	64.759
Strasbourg (latitude : $48.584445^\circ N$, longitude : $7.748612^\circ E$)	0.48042	64.334

Tab. 1.3. Caractéristiques du champ magnétique terrestre à Reims et Strasbourg

Au cours du mouvement du corps rigide, un magnétomètre mesure la projection du champ magnétique terrestre m dans le système de coordonnées mobiles $B(X_B, Y_B, Z_B)$. Selon la technologie de mesure du champ magnétique terrestre utilisée, nous distinguons plusieurs types de capteurs magnétiques ou magnétomètres, regroupés dans le tableau 1.4. Les principes de ces capteurs magnétiques sont bien détaillés dans (Leroy, 2007 ; Lenz, 1990 ; Brauer, 2006). Le capteur magnétique à effet magnétorésistif constitue un exemple de magnétomètre adéquat avec le cahier de charges du système électronique destinée à une application sur l'animal. Ce choix peut être justifié par son appropriation à l'amplitude de variations du champ magnétique terrestre, sa sensibilité élevée, sa petite

taille et sa basse consommation d'énergie. Rappelons que l'effet magnétorésistif a été découvert par Thomson en 1856. Les capteurs s'appuyant sur cet effet sont des semiconducteurs passifs qui se basent sur l'augmentation de la résistance qui se produit lorsque le capteur est exposé à un champ magnétique (Yazdi *et al.*, 1998). Nous montrons dans la figure 1.12 un exemple de magnétomètre basé sur la technologie de magnétorésistance.

Types de magnétomètres
Bobine d'induction
Pompage optique
Fluxgate
SQUID
Magnétodiode
Fibre optique
Effet Hall
Magnétotransistor
Magnétooptique
Magnétorésistance

Tab. 1.4. Principales technologies de fabrication des magnétomètres

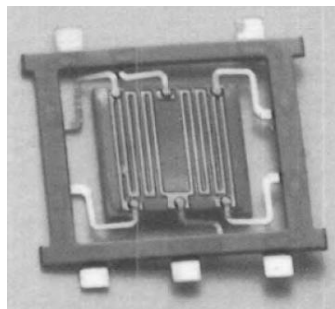


Fig. 1.12. Magnétomètre à effet magnétorésistif

1.3.3.2. Modèle mathématique de mesure d'un magnétomètre

Si trois magnétomètres sont montés en triade orthogonale dans un corps rigide, tels que leurs axes sensibles coïncident avec les principaux axes d'inertie du corps rigide, la sortie du magnétomètre triaxial dans le système de coordonnées mobiles (B) est donnée par le vecteur de mesure suivant (Pflimlin, 2006) :

$$h = M_N^B(q) m + \delta_h \quad (1.40)$$

où m est le champ magnétique terrestre exprimé dans le système de coordonnées fixes (N) par (1.39), δ_n est un bruit considéré blanc et gaussien et $M_N^B(q)$ est la matrice de rotation exprimée dans (1.26). Nous négligeons dans (1.40) la possibilité d'une mauvaise orthogonalité entre les trois axes du capteur. Actuellement, les paramètres du modèle théorique du champ magnétique terrestre m les plus proches de la réalité (à Reims et Strasbourg par exemples) peuvent être déduits à partir de (IGRF, 2010) et sont donnés dans le tableau 1.3.

1.3.4. Les gyroscopes

Le gyroscope est un instrument qui permet la détermination de la position angulaire (selon un, deux ou trois axes) par rapport à un référentiel inertiel (ou référentiel galiléen). Le fonctionnement du gyroscope est basé sur le principe de la conservation du moment cinétique : une toupie tournant autour d'un axe tend à s'opposer à toute modification de l'orientation de cet axe, et donc à le conserver en absence de perturbation extérieure.

1.3.5. Les gyrocompas

Le premier effet des gyroscopes est la permanence de l'axe de rotation de la toupie dans une direction donnée, ce qui permet de les utiliser comme indicateurs de direction. Le problème essentiel consiste à suspendre la toupie en minimisant l'incertitude du couple appliqué sur l'axe de rotation. Tous les gyrocompas sont équipés de détecteurs d'écart, permettant de mesurer, à chaque instant, la position angulaire relative de l'axe de la toupie par rapport au boîtier (Figure 1.13). Les gyrocompas constituent une solution intéressante. Cependant, ils ne sont pas suffisamment miniaturisés pour une application sur les animaux.



Fig. 1.13. Exemple de gyrocompas

1.3.6. Les gyromètres

1.3.6.1. Définition et principe de mesure

Un gyromètre est un capteur inertiel de mouvements qui mesure la vitesse angulaire du référentiel lié au capteur par rapport à un repère de référence absolu suivant un ou

plusieurs axes (Titterton et Weston, 2004 ; Wertz, 2002). Les gyromètres se divisent en deux grandes familles : les gyromètres optiques et les gyromètres mécaniques. Les premiers sont basés sur l'effet Sagnac (Boivin, 2004 ; Lawrence, 1998) et les seconds sur l'effet Coriolis (Titterton et Weston, 2004).

La propriété physique de l'effet Sagnac est à l'origine des gyromètres laser (ou gyrolasers) et des gyromètres à fibre optique (Titterton et Weston, 2004 ; Matthews, 1990) (Figures 1.14 (a) et 1.14 (b)). Ces types de capteurs sont généralement de hautes performances mais encombrants. L'effet Coriolis (la force de Coriolis) a donné naissance aux gyromètres vibrants, dont les principes généraux sont connus depuis l'expérience du pendule de Foucault en 1851. Leur principe de fonctionnement exploite le couplage, induit par effet Coriolis, de deux modes de vibration (excitateur et détecteur) (Lawrence, 1998).

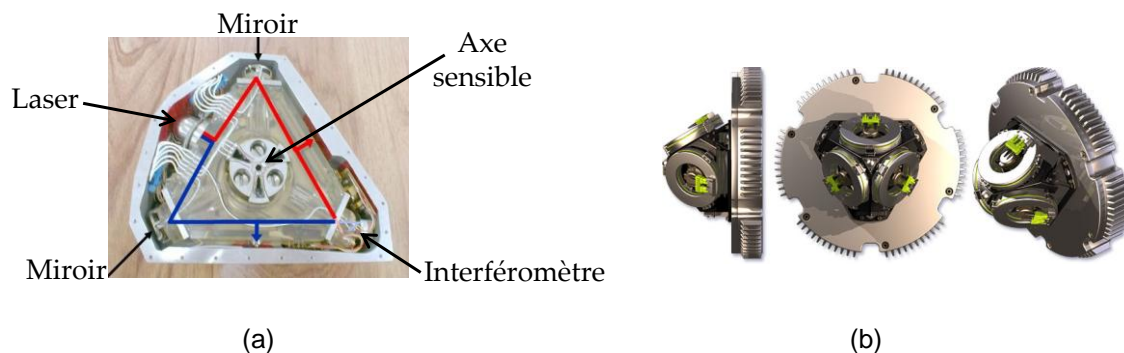


Fig. 1.14. Gyromètre - (a) laser - (b) à fibre optique

Généralement, les gyromètres vibrants sont des capteurs inertiels de moyenne ou basse performance (en termes de précision) mais leur faible coût et leur miniaturisation les rendent attractifs pour certaines applications. Ainsi, nous retenons ce type de capteur dans la future structure de notre système électronique dédié à l'animal. La mesure de vitesse angulaire issue de ce gyromètre sera considérée dans tous les algorithmes d'estimation de l'attitude proposés dans le chapitre 3.

Principe de mesure d'un gyromètre vibrant : Un gyromètre vibrant est composé d'un élément sensible possédant la capacité de pouvoir osciller selon deux axes (x et y) orthogonaux (Figure 1.15). Lorsque l'élément sensible est en vibration le long de l'axe x , si le gyromètre est soumis à une vitesse de rotation Ω autour de l'axe z , une vibration apparaît le long de l'axe y . Cette vibration est excitée par la force de Coriolis et son amplitude est proportionnelle à Ω (Parent, 2008). Afin d'augmenter la sensibilité du gyromètre, les deux vibrations orthogonales ont des fréquences de résonance proches (le maximum de sensibilité correspondant à l'égalité des deux fréquences). Le premier mode, dénommé mode pilote, est excité à sa résonance avec une amplitude asservie pour être constante. Dans ces conditions, l'amplitude de la vibration du second mode, appelé mode détecteur, est donc uniquement proportionnelle à la vitesse de rotation Ω . La mesure d'amplitude de vibration du mode détecteur permet d'estimer la vitesse de rotation.

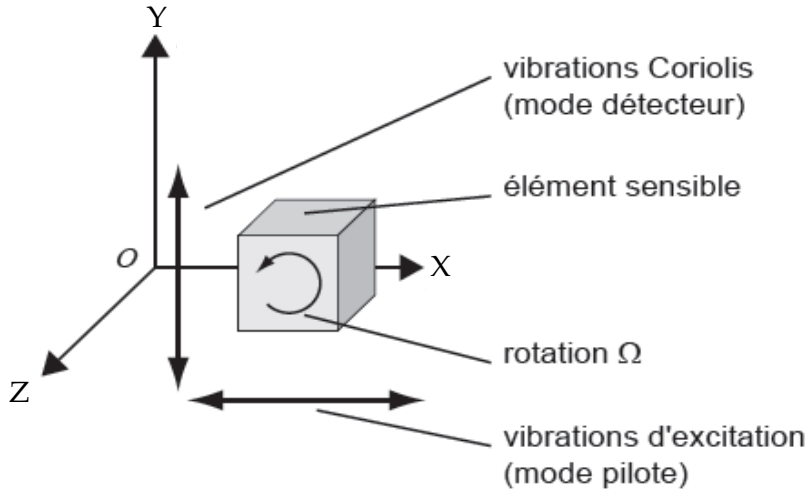


Fig. 1.15. Schéma de fonctionnement d'un gyromètre vibrant à effet Coriolis

Les principaux paramètres qui spécifient la précision d'un gyromètre sont le biais, le facteur d'échelle (sensibilité) et la résolution de mesure du capteur. Le biais correspond au signal de sortie (exprimé en (V)) du capteur en l'absence de signal d'entrée (Beeby *et al.*, 2004). Le facteur d'échelle est le rapport entre la sortie du capteur (exprimée en (V)) et la grandeur d'entrée (exprimée en $(^\circ/s)$); il s'exprime donc en $(V/(^\circ/s))$. Une évolution du biais au cours du temps ou lors de variations de température se traduit directement par une erreur de mesure en valeur absolue (exprimée en $(^\circ/s)$), alors qu'une évolution du facteur d'échelle se traduit par une erreur de mesure exprimée en valeur relative (ppm). La résolution du capteur (exprimée en $(^\circ/s)$) correspond au plus petit signal d'entrée mesurable. La résolution est le produit de la densité spectrale de bruit (exprimée en $(^\circ/s/\sqrt{Hz})$) par la racine carrée de la bande passante du capteur (exprimée en (Hz)). En fonction des applications, les importances respectives de ces trois paramètres peuvent être très différentes.

1.3.6.2. Modèle mathématique de mesure d'un gyromètre

Si trois gyromètres sont montés en triade orthogonale dans un corps rigide, tels que leurs axes sensibles coïncident avec les principaux axes d'inertie du corps mobile, la sortie du gyromètre triaxial (trois sorties simultanées) est donnée par (Pflimlin, 2006) :

$$\omega_G = \omega + b + \delta_G \quad (1.41)$$

où $\omega \in \mathbb{R}^3$ est la vitesse réelle de rotation, $b \in \mathbb{R}^3$ est une fonction lentement variable dans le temps (Grewal *et al.*, 2001 ; Beeby *et al.*, 2004), appelée biais (souvent considérée comme constante) et $\delta_G \in \mathbb{R}^3$ est un bruit blanc (supposé gaussien) lié à la résolution du capteur. Nous négligeons aussi dans (1.41) la possibilité d'une mauvaise orthogonalité entre les trois axes du capteur.

Quelques travaux de la littérature (Martin et Salün, 2007) considèrent que la dynamique de la fonction b peut être décrite par l'équation :

$$\dot{b} = 0 \quad (1.42)$$

D'autres travaux supposent que cette dynamique peut être modélisée par un processus de Gauss-Markov (Brown et Hwang, 1997) décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{b} = \left(-\frac{1}{\tau} I_{3 \times 3} \right) b + \delta_b \quad (1.43)$$

où $\delta_b \in \mathbb{R}^3$ est supposé être un bruit blanc et gaussien et τ est une constante de temps relative à la variation du biais.

1.4. Capteurs d'attitude à base de technologie MEMS

Le développement de l'électronique et des micro-technologies nous a permis d'obtenir de nouveaux capteurs bien adaptés aux applications de basses ou moyennes performances. Ce sont les MEMS.

Un MEMS est un système microélectronique composé d'éléments électroniques analogiques et numériques. Les MEMS (aussi désignés sous l'appellation de *Microsystèmes* en Europe ou *Micromachines* au Japon) sont des solutions économiques réunissant un ensemble de composants réalisés le plus souvent sur silicium à l'aide de micro-technologies. Ils emploient des technologies microélectroniques pour réaliser des dispositifs qui, en plus d'être des circuits électroniques, sont des capteurs et/ou des actionneurs. L'association de la microélectronique sur silicium avec la technologie de micro-usinage a rendu possible la réalisation de systèmes sur puce complets. Ces composants profitent à la fois d'une extrême miniaturisation, d'un poids et d'une consommation énergétique faibles, ce qui leur confère un rapport performance/coût très avantageux.

Parmi la grande diversité de capteurs disponibles en technologies MEMS, nous pouvons citer les capteurs inertiels constitués par les accéléromètres et les gyromètres et les capteurs magnétiques représentés par les magnétomètres. Quelques exemples de ces capteurs sont montrés dans la figure 1.16. Cette technologie est bien adaptée au *Bio-logging* puisqu'elle nous permet de concevoir des systèmes électroniques miniaturisés, à faibles coûts et à basses consommations d'énergie.

A titre d'exemple, nous présentons en annexe A.3 des exemples industriels de capteurs inertiels et magnétiques (accéléromètre triaxial, gyromètre triaxial et magnétomètre triaxial) dédiés aux applications de la navigation et l'estimation de l'attitude.

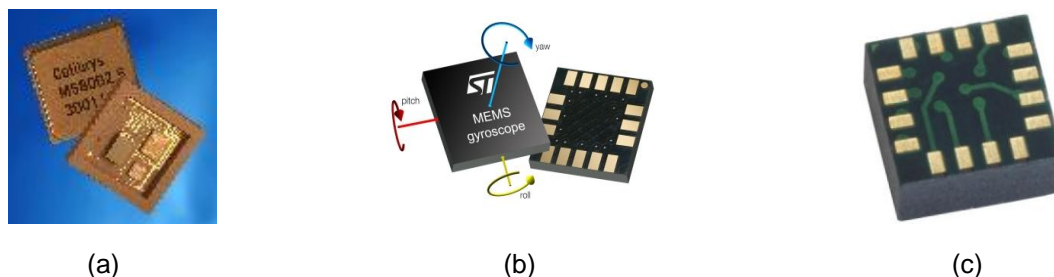


Fig. 1.16. Capteurs MEMS - (a) accéléromètre - (b) gyromètre - (c) magnétomètre

1.5. Exemples de systèmes inertiels de calcul de l'attitude

Les systèmes inertiels se divisent en trois catégories à savoir les unités de mesures inertiels (**IMU**⁶), les centrales d'attitude et de cap (**AHRS**⁷) et les centrales inertiels (**INS**⁸) (De Laubier, 2008) (Figure 1.17). Ces systèmes utilisent la technique nommée *Strapdown*. Cela implique que le module de capteurs est attaché de façon plus ou moins rigide au corps et permet de détecter les accélérations, les rotations et les champs magnétiques de façon simultanée et coordonnée.

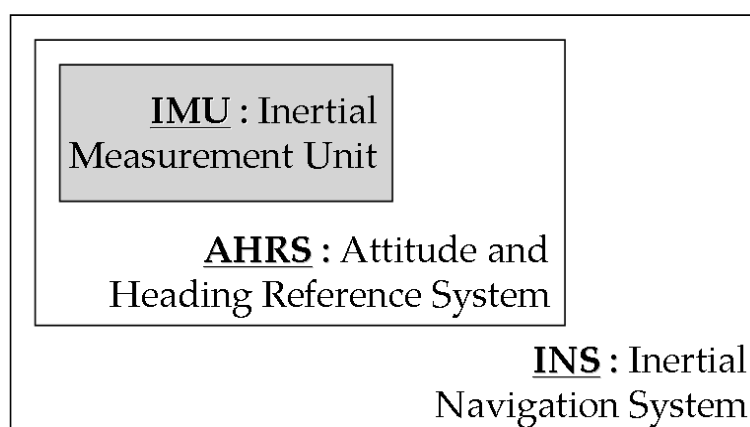


Fig. 1.17. Différentes catégories de systèmes inertiels

Par définition, *une unité de mesure inertielle* IMU contient principalement trois gyromètres et trois accéléromètres (et parfois trois magnétomètres) montés en triaxe orthogonal. Elle permet de mesurer selon les trois axes les composantes de l'accélération et de la vitesse instantanée de rotation du corps rigide par rapport à un référentiel inertiels (qui est confondu avec le repère terrestre dans la plupart des cas). Les unités de mesures inertiels sont aussi munies de sondes de température permettant de recalibrer le biais des gyromètres et des accéléromètres. Elles intègrent une électronique permettant de corriger les données capteurs : compensation de l'accélération au niveau de la mesure des gyroscopes, autocompensation en température, orthogonalisation des axes de mesure, etc.

⁶ **IMU** : Inertial Measurement Unit

⁷ **AHRS** : Attitude and Heading Reference

⁸ **INS** : Inertial Navigation System

Une centrale d'attitude est conçue à base d'une unité de mesure inertielle mais ayant en plus la capacité de calculer en temps réel l'orientation de l'objet qui la supporte (Grewal *et al.*, 2001).

En complément, une centrale inertielle permet de calculer en temps réel, à partir des composantes de l'accélération, l'évolution du vecteur vitesse et de la position du véhicule à bord duquel elle est installée (Farrell et Barth, 1998). La différence majeure entre les deux équipements est la phase de traitement des données capteurs. En effet, dans le cas de la centrale d'attitude, les capteurs sont identiques à ceux utilisés dans une centrale inertielle mais le traitement des données n'est pas prévu pour le calcul de position.

Le développement des capteurs MEMS ces dernières années a été un facteur déterminant dans l'apparition de systèmes inertiels miniaturisés d'attitude et de position sur le marché. Nous proposons en annexe A.4 trois tableaux récapitulant des exemples de ces systèmes avec leurs constructeurs associés. Notons que leurs algorithmes internes de calcul d'attitude et de position sont dans la plupart du temps basés sur des filtres de Kalman (ou Kalman étendu) (Brown et Hwang, 1997). Ces algorithmes sont associés à des processeurs rapides pour traiter les calculs nécessaires à la détermination de l'attitude et la position. Ces données sont converties parfois par la suite dans un format accessible ou même affichable sur un écran.

1.6. Conclusion

Ce premier chapitre a permis de présenter les différents outils et moyens nécessaires pour introduire la problématique d'estimation de l'attitude d'un corps rigide dans un cadre général mais exhaustif. En effet, l'intérêt s'est surtout porté sur les capteurs pouvant servir à l'application de ce travail qui est autour de l'étude du mouvement de l'animal.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons exposé des notions préliminaires sur les corps rigides, le concept de l'attitude et les repères utilisés pour l'exprimer. Ainsi, nous constatons qu'il est possible d'assimiler approximativement l'animal à un corps rigide et que son attitude pourrait être définie à l'aide de deux systèmes de coordonnées, l'un mobile lié au corps et l'autre fixe lié à la terre. Nous avons ensuite dressé un état de l'art des représentations usuelles de l'attitude suivie d'une synthèse détaillée regroupant leurs avantages et leurs inconvénients. En faisant le lien entre les propres suggestions de notre application et les caractéristiques de chaque représentation de l'attitude, l'approche par les quaternions nous paraît la plus appropriée. Cet outil mathématique assure un bon compromis pour satisfaire les demandes de notre application. Les algorithmes développés par la suite pour l'estimation des attitudes seront entièrement basés sur l'utilisation de l'algèbre des quaternions.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté les principaux capteurs utilisés pour l'estimation de l'attitude avec une attention particulière donnée aux capteurs accéléromètres, magnétomètres et gyromètres. La fusion des mesures issues de ces trois capteurs constitue une solution commode pour répondre à la problématique étudiée.

La troisième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la technologie MEMS qui domine de nos jours le marché des capteurs d'attitude (accéléromètres, magnétomètres et gyromètres).

Finalement, la quatrième partie est réservée à des définitions classiques de systèmes inertiels d'attitude (IMU, AHRS et INS) exploitant principalement les capteurs d'attitude présentés précédemment.

Chapitre 2

Application de l'estimation de l'attitude au Bio-logging

2.1. Introduction

A ce stade, les outils de travail nécessaires à l'estimation de l'attitude ont été définis. Nous présentons au cours de ce chapitre cette problématique dans le cadre du *Bio-logging*, une science qui étudie le comportement animal dans la nature à l'aide de microsystèmes embarqués sur son corps.

Les notions basiques de ce domaine sont présentées en premier lieu. Ensuite, une synthèse des principales techniques d'enregistrement de données liées à l'animal est élaborée. Nous présentons ensuite les objectifs du projet **NaviMeles**⁹ dans lequel s'inscrit ce travail. Nous nous intéressons principalement à l'estimation de l'attitude de l'animal, appelée encore posture. Afin de bien placer le lecteur dans le cadre de cette thématique, nous passons en revue les différents domaines d'application où une information sur l'attitude s'avère indispensable, avec un développement particulier des méthodes utilisées dans le cadre du *Bio-logging* pour reconstruire l'orientation de l'animal. Par la suite, après le choix de la solution de capteurs adaptée, nous dressons une synthèse des principales méthodes d'estimation de l'attitude utilisant ces trois capteurs, à savoir les méthodes basées sur les techniques de moindres carrés, les filtres de Kalman, les observateurs non linéaires et les filtres complémentaires. Cette étude nous a permis de retenir quelques techniques qui nous seront utiles dans le chapitre 3 lors de la proposition des approches d'estimation de l'attitude. Nous terminons ce chapitre sur les liens qui existent entre le calcul de l'attitude de l'animal et celui de son accélération propre (travail mécanique) ainsi que sa position.

⁹ **NaviMeles** : Navigation à l'estime à l'étude du Blaireau d'Europe - MELES meles

2.2. Bio-logging : une méthode pour comprendre les systèmes naturels

2.2.1. Principales contraintes liées à l'étude de la biologie de certains organismes

Jusqu'à la moitié du siècle dernier, l'obtention de nouvelles informations sur le mode de vie des espèces animales en milieu naturel était limitée à l'observation visuelle directe. Ces approches sont encore courantes aujourd'hui et profitent de plus en plus des améliorations technologiques apportées, telles que la photographie, la vidéo (optique, infrarouge ou thermique), les radars et les scanners hyperspectraux (Amlaner et McDonald, 1980).

Cependant, malgré les progrès technologiques, il s'avère que ces études restent souvent entravées par des éléments qui peuvent survenir entre les capacités sensorielles de l'observateur humain et l'animal en question, si ce n'est l'impossibilité complète d'accès dans le cas des espèces évoluant dans des milieux particulièrement inaccessibles (éloignement ou type de milieu). Ainsi, pour de nombreuses espèces animales, il existe une limite qui empêche l'observation et la collecte de données en utilisant les méthodes conventionnelles. Ces limites sont généralement liées soit aux caractéristiques des espèces (taille, sensibilité au dérangement, fragile, rare ou dangereuse), soit aux conditions naturelles de leur milieu de vie (marin, cavernicole, etc.) (Ropert-Coudert et Wilson, 2005). Par conséquent, les informations essentielles sur leur histoire et mode de vie, leur comportement, leur écologie ou physiologie, et les propriétés de leur environnement sont rares ou inexistantes.

Particulièrement pour ce qui concerne la physiologie comparée (adaptation au jeûne et à la plongée par exemple) et la physiologie des grandes fonctions (échanges gazeux, thermorégulation, prise alimentaire, etc.), la plupart des recherches portant sur les mécanismes sont menées sur des espèces domestiques ou *de laboratoire* (souris, rat, etc.) et elles sont fondées sur des études élaborées dans les laboratoires (Dejours, 1981). Le principal intérêt de ces approches en captivité est le fait de manipuler des paramètres connus en conditions environnementales contrôlées. Néanmoins, la principale limite est que les mécanismes mis en place pour résister à des conditions environnementales particulières ne peuvent souvent se révéler, dans toutes leurs complexités, que si l'animal est étudié, libre de ses mouvements, dans les conditions naturelles (Handrich *et al.*, 1997 ; Schmidt-Nielsen, 1997). Dans le domaine du comportement et des stratégies mises en place par les individus pour réaliser les activités liées à leur cycle de vie (reproduction, migration, etc.), selon les conditions biologiques (disponibilité alimentaire, niveau de prédation, etc.) et physiques (saison, conditions météorologiques et physico-chimique, etc.) du milieu, le besoin de suivre ces animaux dans leur milieu, avec le moins possible de perturbations, est évident. Heureusement, les avancées technologiques de ces dernières décennies ont révolutionné l'approche de l'animal dans son milieu, et ont permis aux chercheurs en biologie et physiologie animale de sortir de leur laboratoire pour étudier

ces adaptations, à l'échelle individuelle ou celle des populations, sur des modèles animaux vivant librement dans leur environnement naturel.

2.2.2. Nouvelles frontières dans l'étude des organismes avec le Bio-logging

Le concept du *Bio-logging* a été introduit depuis les années 1940. Cette science s'intéresse à l'étude du comportement, de la physiologie, de l'écologie et des propriétés de l'environnement des animaux vivant en liberté (bioclimatique, réseaux trophiques, changements globaux, etc.) et qui sont souvent au-delà de la frontière de visibilité ou de notre expérience (Davis, 2008 ; Rutz et Hays, 2009). Ce terme est composé de deux mots : *biology* et *logging*. Le deuxième mot est dérivé d'une ancienne appellation *ship's log* signifiant l'ensemble des documents nécessaires pour la gestion des navires en navigation maritime (carnet de bord) (Ropert-Coudert et Wilson, 2005).

Il est important de mentionner que le terme *Bio-logging* a été *officialisé* pour la première fois lors de l'événement scientifique **ISBS**¹⁰ qui s'est déroulé au **NIPR**¹¹ en 2003 (NIPR, 2010 ; Boyd *et al.*, 2004). Le développement rapide de ce domaine ces dernières années a été accompagné par le succès des trois symposiums dédiés à ce domaine (*Bio-logging I* en 2003, *Bio-logging II* en 2005 et *Bio-logging III* en 2008) et la croissance du nombre de publications scientifiques en relation avec ce domaine (Burger et Shaffer, 2008 ; Ropert-Coudert *et al.*, 2009). Cette approche est d'une importance cruciale à une époque où les changements climatiques, la surexploitation des ressources et la destruction des milieux menacent la survie de toutes les espèces animales et végétales (Le Maho, 2003).

Le *Bio-logging* a trouvé son origine dans l'environnement marin (Kooyman, 2004) puis s'est diversifié vers l'étude des espèces volantes et terrestres. La définition que nous pouvons donner du *Bio-logging* est la suivante : l'étude des animaux libres de leurs mouvements dans leur environnement naturel grâce à des enregistreurs autonomes miniaturisés, appelés souvent *loggers* (Naito, 2004), généralement attachés à leurs corps. Ces systèmes permettent de mesurer et d'enregistrer ou téléporter des paramètres biologiques ou physico-chimiques liés à l'individu et/ou à son milieu. Les *loggers* assurent le suivi temporel des paramètres physiques et biologiques sur des périodes allant de quelques heures à plusieurs mois, voire sur une année et à des fréquences d'échantillonnage allant de la minute à plusieurs fois par seconde. Une définition du *Bio-logging* au sens strict concerne les appareils qui ne font que stocker dans leurs propres mémoires les informations issues du comportement de l'animal évoluant dans un milieu trop éloigné ou inaccessible pour permettre une lecture en temps réel des données, et qu'il faut distinguer alors de la bio-téléométrie.

Depuis son apparition, le *Bio-logging* a connu un essor remarquable et une diversification au niveau des techniques physiques, électroniques et informatiques utilisées pour suivre à distance les animaux ainsi que les méthodes d'analyse et de

¹⁰ **ISBS** : International Symposium on Bio-logging Science

¹¹ **NIPR** : National Institute of Polar Research

traitement des signaux issus des *loggers*. Il existe à ce jour plusieurs types de capteurs utilisés (seuls ou en groupe) (Ropert-Coudert et Wilson, 2005). Une étude de l'évolution des techniques d'enregistrement, utilisées en *Bio-logging*, est détaillée dans (Ropert-Coudert et Wilson, 2005 ; Kooyman, 2004). Toutefois, des exemples de méthodes déjà déployées sur les animaux seront présentés ultérieurement.

2.2.2.1. Localisation par télémétrie et GPS

La télémétrie est une technique qui a été utilisée dans l'étude du comportement de l'animal (Amlaner et McDonald, 1980), principalement pour suivre ses déplacements géographiques. Cette technique a été premièrement utilisée dans le cas des animaux terrestres et volants puis s'est diversifiée pour les espèces marines. Parmi les techniques majeures de localisation, on distingue : la télémétrie radio (**VHF**¹² appelé encore *radio-tracking*), la télémétrie acoustique et la télémétrie par satellite. La télémétrie radio permet de localiser les animaux par triangulation et suppose être à proximité d'eux puisque les transmetteurs utilisés possèdent une puissance d'émission limitée à quelques kilomètres. De plus leur durée de transmission est déterminée par la capacité de la batterie. Plus récemment la transmission par satellite ou la télémétrie satellitaire (Hart et Hyrenbach, 2009) a été déployée dans le système **ARGOS**¹³. Ce dernier est né en 1978 d'une coopération entre le **CNES**¹⁴, l'**NOAA**¹⁵ et la **NASA**¹⁶. ARGOS permet de localiser les émetteurs compatibles (ou balises) n'importe où à la surface de la terre avec une précision d'environ 150 mètres. Le système ARGOS fonctionne sur le principe de l'effet Doppler et la position des mobiles (balises Argos) est connue directement à partir des centres de traitement de données. Les biologistes utilisaient souvent ce système pour étudier la migration et la biologie de nombreux animaux dans leur milieu naturel, sur terre, en mer ou dans les airs, tels que les albatros, les manchots, les baleines, les tortues, etc. (Figure 2.1). Cela permet d'obtenir une cartographie des déplacements, ainsi que les rythmes saisonniers ou journaliers d'activités.



Fig. 2.1. Balises ARGOS attachées aux corps de quelques animaux

¹² **VHF** : Very High Frequency

¹³ **ARGOS** : Advanced Research and Global Observation Satellite

¹⁴ **CNES** : Centre National d'Etudes Spatiales

¹⁵ **NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration

¹⁶ **NASA** : National Aeronautics and Space Administration

Cette technique de localisation/transmission a été par la suite couplée à des petits systèmes électroniques embarqués pour collecter et envoyer des paquets de données pas trop volumineux (faible fréquence d'échantillonnage ou données pré-analysées en temps réel) telles que la durée et la profondeur maximale de plongée, la température toutes les 10 *min*, et la salinité par exemple (Cooke *et al.*, 2004) pour étudier quelques aspects de la physiologie et du comportement alimentaire chez l'animal. Avec l'arrivée des techniques de **GPS**¹⁷ (Bograd *et al.*, 2010), la localisation des animaux est devenue plus précise et fiable que celle obtenue par ARGOS. En effet, ce système comprend au moins 24 satellites orbitant à 20200 *km* d'altitude et permettant la géolocalisation de l'individu portant le récepteur. Les données de localisation GPS sont par la suite soit accumulées sur le *logger* qui doit être récupéré au retour de l'animal, soit renvoyées par ARGOS ou **GSM**¹⁸. La seule justification de la transmission des données GPS, quand elles sont accumulées déjà dans le *logger*, est la difficulté ou l'impossibilité de re-capture de l'animal. La contrepartie en effet est énergétique (autonomie ou taille du *logger*), vu la grande consommation d'énergie pendant la transmission des données aux satellites ou au réseau téléphonique local. Les techniques de localisation par ARGOS ou GPS restent néanmoins limitées dans le cas des animaux marins plongeurs, qui passent la majorité de leurs temps sous l'eau.

Avec l'avènement de l'échantillonnage à plusieurs dizaines de *Hz* de différentes paramètres physiques et l'ouverture à de nouvelles informations biologiques (**ECG**¹⁹, mouvements des membres, de la mâchoire, etc.), la possibilité de transmission par télémétrie est redevenue limitante.

2.2.2.2. Techniques d'enregistrement sur le *logger*

Afin de contourner les limitations généralement posées par la technique de télémétrie au niveau de la transmission, de la continuité des données et de surconsommation d'énergie, la solution était d'enregistrer les informations collectées dans le bio-logger porté par l'animal étudié. Cette approche a été utilisée depuis maintenant une quarantaine d'années (Kooyman, 2004). La première limitation est donc de pouvoir récupérer facilement l'animal. Cela reste possible par exemple pour toutes les espèces marines se reproduisant ou venant muer à terre.

Le premier bio-logger a été déployé en 1940 par Pers Scholander (Scholander, 1940) sur des baleines. Il consiste en une jauge de profondeur capillaire permettant de mesurer les profondeurs maximales de l'animal. Ce type de système a conduit à l'apparition d'un nouveau dispositif mécanique appelé enregistreur pression/temps **TDR**²⁰. Il a été utilisé pour la première fois en 1965 pour enregistrer les changements de pression de l'eau au cours du temps ce qui a permis d'étudier l'activité sous-marine de quelques espèces

¹⁷ **GPS** : Global Positioning System

¹⁸ **GSM** : Global System for Mobile Communications

¹⁹ **ECG** : Electrocardiogramme

²⁰ **TDR** : Time/Depth Recorder

(Kooyman, 2004). Il a été déployé principalement sur des éléphants de mer, des manchots et des tortues (Figure 2.2). Sa structure a connu au fil des années plusieurs améliorations au niveau de la miniaturisation et l'autonomie (> 80 jours) (Naito *et al.*, 1990). D'autres types de capteurs peuvent être additionnés à ces systèmes tels que des hydrophones, des caméras vidéo et des thermistances.

Les progrès des composants électroniques et des microprocesseurs depuis les années 1980 ont été à l'origine de l'apparition de nouveaux capteurs miniaturisés et performants à la place des premiers enregistreurs TDR. Cela a permis le développement de bio-loggers analogiques et numériques plus petits et plus légers (appelés aussi data loggers). Ainsi, il est devenu possible d'embarquer plusieurs types de capteurs dans le même bio-logger. Ces capteurs mesurent une multitude de données telles que la pression, la température, la lumière, la fréquence cardiaque, la vitesse de nage, etc. En parallèle, l'augmentation des capacités des mémoires numériques a rendu possible le suivi du comportement de l'animal sur de longues périodes, ou l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage. De moins d'une donnée par minute avec les premiers TDR à mémoire électronique, on est maintenant à plusieurs *Hz*, voire 250 *Hz* pour l'enregistrement de l'électrocardiogramme. Le passage à des fréquences d'échantillonnage supérieures au *Hz* a permis notamment l'utilisation d'accéléromètre ou de capteur magnétique à effet Hall, permettant de mesurer des activités telles que le comportement alimentaire (ouverture/fermeture du bec) et les activités locomotrices liées à la poursuite des proies (fréquence des battements d'aile, accélération et freinage brutales mesurées avec les accéléromètres). De nos jours, ces systèmes peuvent également enregistrer une diversité de données à haute densité telles que des images, de la vidéo et des sons (étude des comportements sociaux des baleines).

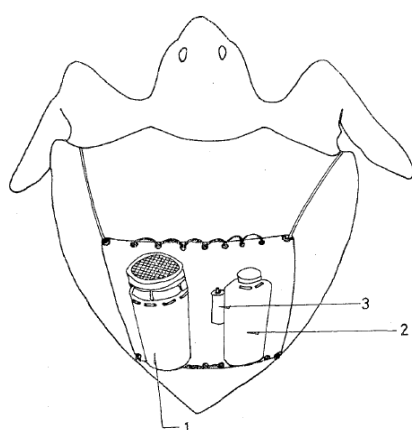


Fig. 2.2. Système électronique attaché à une tortue - (1) enregistreur distance/temps - (2) enregistreur pression/temps (TDR) - (3) enregistreur température/temps

L'apparition vers les années 1980 d'une nouvelle génération de capteurs MEMS a permis de fiabiliser l'utilisation de capteurs qui en technique numérique étaient mal

calibrés (hautement dépendant de la température du capteur) tels que les capteurs de pression, les accéléromètres ou les magnétomètres.

Cependant, cet avantage crucial pour la fiabilité des données s'accompagne encore de consommation de courant plus importante qu'avec la technologie analogique. Actuellement, si l'on tient compte des fréquences d'échantillonnage élevées et de la consommation des capteurs, la mémorisation des données brutes et l'autonomie des batteries deviennent les facteurs limitants. Si la taille mémoire et leur encombrement ne constituent plus un problème, le processus d'enregistrement des données en haute fréquence devient un nouveau défi énergétique. Tant que de gros progrès ne seront pas faits pour améliorer la capacité/masse spécifique des batteries, ou pour trouver un moyen de limiter les besoins en énergie des MEMS ou de l'écriture en mémoire, il sera difficile de réduire encore la taille des bio-loggers. Dans bien des applications actuelles, l'impossibilité de les utiliser sur l'animal est liée à la taille/masse des batteries. La prochaine grande étape dans la miniaturisation des bio-loggers dépendra donc des innovations en technologie des batteries et leur rechargement à distance, en profitant du passage régulier des animaux sur des sites connus à l'avance (site de reproduction, gîtes de repos, etc.).

Une étude du marché des bio-loggers montre qu'il existe une variété importante de microsystèmes qui ont été déployés sur divers animaux et qui ont servi dans différentes études scientifiques. Nous distinguons par exemple les bio-loggers *Little Leonardo*, *Wildlife*, *Sirtrack*, *DTAG*, *Daily Diary*, *MAMMARK*, etc. Leurs détails techniques, présentés en annexe B.1, permettent au lecteur de parcourir brièvement l'éventail actuel des principaux capteurs, des architectures des différents types de bio-loggers et leurs possibilités de mesures.

2.2.2.3. Discussion

Le Bio-logging est un domaine qui s'intéresse à l'étude du comportement de l'animal à l'aide de systèmes électroniques attachés à son corps. Avec le développement technologique des capteurs et l'apparition d'une nouvelle génération de capteurs miniaturisés, il est devenu possible de concevoir des bio-loggers qui nous permettent d'accéder à de nouvelles informations comportementales de grande précision sur la position, la vitesse de déplacement et surtout la posture de l'animal. Les bio-loggers DTAG, Daily Diary et MAMMARK représentent de bons exemples de cette nouvelle génération de bio-loggers capable de reconstruire la posture d'un individu. Cette information nous intéresse directement et constitue dans la suite la problématique centrale traitée. L'étude bibliographique présentée réalisée sur les bio-loggers est également importante dans la mesure où elle nous permettra de positionner l'approche Bio-logging menée au sein de notre laboratoire par rapport à la littérature, principalement au niveau des outils de calcul de l'attitude et de la position.

2.2.3. Approche Bio-logging à l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien

Le **DEPE**²¹ est un laboratoire du **CNRS**²² de Strasbourg appartenant à l'**IPHC**²³. Le DEPE s'est fait remarquer au premier plan international par une approche mécanistique de l'écophysiologie animale, et notamment les travaux dans le développement du *Bio-logging*. Les premiers développements techniques dans ce domaine au sein du DEPE datent des années 90. Cet effort s'est poursuivi dans le cadre de plusieurs projets concernant l'étude du comportement des animaux, principalement les manchots (empereur, royal, Adélie), les tortues marines (tortue verte, tortue luth), les cigognes (noires et blanches) et dernièrement le blaireau d'Eurasie. Les développements constants en microélectronique ont révolutionné l'approche écophysiologique de l'animal au sein du DEPE.

Depuis la création de l'IPHC en 2007, d'autres équipes de recherches se sont impliquées dans les projets de recherche du DEPE notamment l'équipe de microélectronique de l'**IN2P3**²⁴. Cette équipe développe une nouvelle génération de bio-loggers pour répondre au cahier des charges de chaque projet. En équipant ces animaux d'émetteurs ou de récepteurs couplés à des systèmes d'acquisition de données ultra-miniaturisés, il est possible d'accumuler une masse d'informations considérables sur la physiologie (température interne, fréquence cardiaque, électrocardiogramme, etc.), le comportement (vitesse, accélération, position, profondeur ou altitude au cours d'un déplacement, etc.) et/ou l'environnement (température, salinité de l'eau, lumière, etc.) de l'animal évoluant librement dans son milieu naturel.

Toutes ces informations permettent aujourd'hui d'étudier comment ce dernier fait face aux contraintes environnementales, sa stratégie alimentaire et les limites de sa capacité à s'adapter.

Deux familles de bio-loggers sont développées au sein du DEPE : les micro-loggers et les macro-loggers.

2.2.3.1. Les micro-loggers

Ces systèmes électroniques sont architecturés autour d'un microcontrôleur 8 *bits* d'Atmel (ATmega644P) (Atmel, 2010), 64 ko de mémoire, fonctionnant à 4 *Mhz* avec une alimentation de 3.3 V et autorisant un nombre réduit de capteurs. Six modèles de micro-loggers ont été développés au DEPE, chacun diffère de l'autre par l'ensemble de capteurs embarqués (IPHC-DEPE, 2010). Nous les regroupons dans un tableau en annexe B.2. Ces micro-loggers sont tous alimentés par une pile faisant 23×14×14 *mm* et sont enrobés en résine lorsqu'il s'agit de les utiliser sur des animaux marins. Cette matière permet au *logger* de résister aux grandes pressions pouvant atteindre 200 *bars*. La fréquence

²¹ **DEPE** : Département d'Ecologie, Physiologie et Ethologie

²² **CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique

²³ **IPHC** : Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien

²⁴ **IN2P3** : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

d'échantillonnage des capteurs embarqués dans ces bio-loggers ne dépasse pas 1 Hz. Ces *loggers* ont été déjà déployés dans les **TAAF**²⁵ sur des manchots. Ils possèdent des modèles externes positionnés sur le dos tels que le *PT20L_8M* (Figure 2.3 (a)) et des modèles internes placés au niveau abdominal tels que le *PT20T2_8M* et le *PT20T2_SD_CC* (Figure 2.3 (b)). Les *loggers* *PT20L_8M* et *PT20T2_8M* ont une dimension de 50×50×19 mm et pèsent 30 grammes. Les *loggers* *PT20T2_SD_CC* ont une dimension de 40×30×15 mm et pèsent aussi 30 grammes.

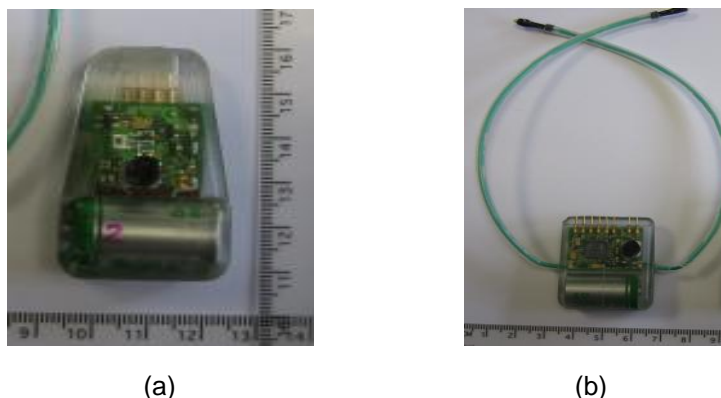


Fig. 2.3. Micro-loggers développés à l'IPHC-DEPE - (a) PT20L_8M - (b) PTT2_CC

2.2.3.2. Les macro-loggers

Les macro-loggers sont articulés autour d'un microcontrôleur Cyan (Cyan, 2010) axé sur les performances et permettant un nombre plus important de capteurs au détriment de la taille. Les macro-loggers sont capables de gérer des capteurs dits *complexes* tels que les GPS, les accéléromètres, l'ECG etc. Sept modèles de macro-loggers ont été développés à l'IPHC, chacun diffère de l'autre par l'ensemble de capteurs embarqués (IPHC-DEPE, 2010). Nous citons ainsi le Macro GPS Mirette (Figure 2.4 (a)) , le Macro FC M, le MacroLoggerGene, le Macro FC B - 2G - 1.0 (Figure 2.4 (b)), le Macro FC M - 1.1 (Figure 2.4 (c)), le Macro FC B - 3G - 1.1, le Macro FC B - Sesam et le Macro IPEV. Ces bio-loggers sont décrits en détails en annexe B.3. Ils sont équipés d'une mémoire micro SD de 1 ou 2 Go.

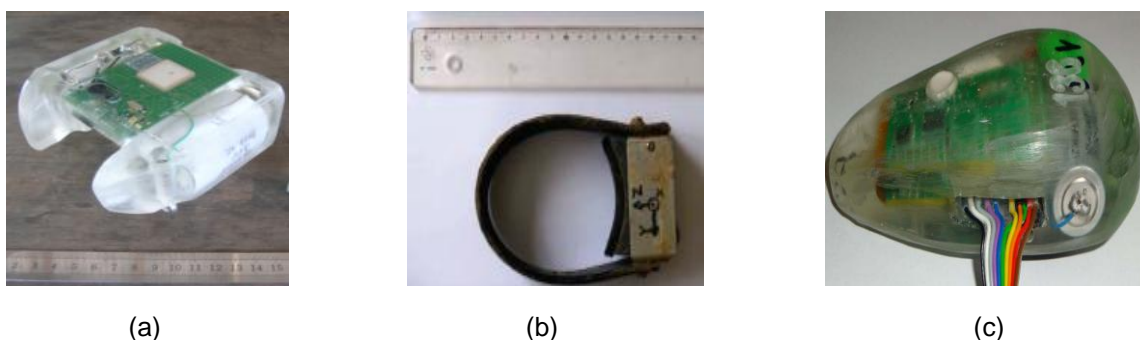


Fig. 2.4. Macro-loggers développés à l'IPHC-DEPE - (a) GPS - (b) FC B - 2G - 1.0 - (c) FC M - 1.1

²⁵ **TAAF** : Terres Australes et Antarctiques Françaises

2.3. Projet *NaviMeles* : présentation et objectifs

2.3.1. Présentation du projet

Le projet de recherche *NaviMeles* a été initié par le DEPE en collaboration avec le **CReSTIC**²⁶ de l'**URCA**²⁷. L'équipe *Automatique* du CReSTIC travaille particulièrement sur la modélisation, commande et observation (estimation) des systèmes complexes (Saadaoui *et al.*, 2006 ; Hamdi *et al.*, 2009) avec des applications en systèmes embarqués et génie biomédical (Manamanni *et al.*, 2005 ; Seddiki *et al.*, 2010).

D'autres partenaires sont associés à ce projet tels que, le **2C2A-CERFE**²⁸ et le **GEPMA**²⁹, pour capturer les animaux et réaliser les essais sur le terrain et une entreprise alsacienne **CMR-SMR**³⁰ qui développe et produit des systèmes de test, de mesure et d'inspection dans des conduites industrielles par des vecteurs spécialisés. Cette entreprise s'intéresse donc aux travaux développés dans ce travail pour d'autres applications telle que la reconstitution spatiale du déplacement de leur vecteur spécialisé. Le financement de ce projet est assuré par les régions Alsace et Champagne Ardenne.

2.3.2. Objectifs du projet

L'objectif final de ce projet consiste à concevoir un microsystème embarqué de navigation à l'estime permettant de résoudre principalement les trois problématiques liées suivantes (Figure 2.5) (Fourati *et al.*, 2008a) :

- La reconstitution des postures ou des orientations spatiales 3D (attitude) de l'animal (et de l'homme ou de tout mobile manufacturé).
- La reconstitution du travail locomoteur et des dépenses énergétiques de l'animal au cours de ses activités quotidiennes, ou de l'homme.
- Le calcul des déplacements ou positions (relatifs, absolus, allures) de l'animal dans l'espace 3D (et de l'homme ou de tout mobile manufacturé).

L'implication de médecins ou d'industriels au projet est liée au fait que tout progrès dans les domaines de la reconstitution des attitudes, déplacements ou dépenses locomotrices présente des possibilités importantes d'applications. Par exemple l'assistance au déplacement pour les malvoyants, les drones (volants ou hypogés), la recherche médicale dans le domaine de l'obésité (monitoring déambulatoire de patients obèses), etc.

²⁶ **CReSTIC** : Centre de recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

²⁷ **URCA** : Université de Reims Champagne Ardenne

²⁸ **2C2A-CERFE** : Centre de Recherche et de Formation en Eco-éthologie de la Communauté de Communes de l'Argonne Ardennaise

²⁹ **GEPMA** : Groupe d'Etude et de Protection des Mammifères d'Alsace

³⁰ **CMR-SMR** : Construction Matériel Réseaux

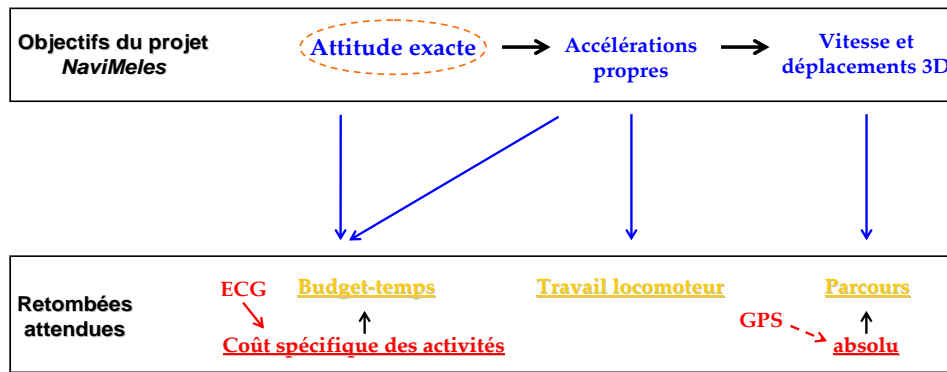


Fig. 2.5. Projet NaviMeles et objectifs - premier objectif principal : reconstitution de l'attitude

Le projet *NaviMeles* est né suite à la difficulté pour les biologistes du DEPE à accéder aux informations relatives aux déplacements de leurs modèles d'étude (blaireau ou manchot). Pour ces animaux vivant en milieu forestier ou marin, les techniques de positionnement par GPS ne peuvent s'appliquer que pendant une faible proportion de leur temps de déplacement, laissant donc une grande part de leur budget temps inaccessible à toute investigation. L'alternative technique était d'utiliser des *loggers* permettant de reconstituer à la fois l'attitude et les déplacements 3D de l'animal grâce à des capteurs proprioceptifs, indépendant donc de l'accessibilité à une couverture satellite. Comme nous le verrons plus loin en détail, nous utiliserons dans ce projet une unité de mesure inertielle pour traiter la problématique d'estimation de l'attitude. Nous rappelons que l'attitude constitue l'information essentielle permettant aux biologistes d'accéder par la suite aux calculs de la position et des dépenses locomotrices en terme énergétique.

L'étude éco-physiologique de ce projet s'intéresse par ailleurs à deux espèces animales (Manchot et Blaireau).

♦ Les manchots

Les manchots (penguin en anglais, à ne pas confondre avec pingouin), sont des espèces d'oiseaux marins, incapables de voler à cause de leur adaptation extrême à la vie marine et à la plongée en eau profonde (Figure 2.6 (a)). Les 18 espèces actuelles de manchots se retrouvent dans des habitats variés de l'Hémisphère Sud, depuis l'Antarctique à l'Equateur. Les manchots les plus grands en taille, et les plus connus du grand public sont les manchots empereur et royal. Le manchot empereur est le plus grand et le plus lourd de tous les manchots, avec une hauteur atteignant jusqu'à 120 cm pour un poids qui varie entre 20 et 40 kg. Il peut plonger à plus de 500 m pour chercher de la nourriture durant des périodes temporelles d'environ 10 minutes. Cela laisse ainsi difficile leur suivie par la technique de GPS au cours de ces périodes. Selon l'**UICN**³¹, autorité mondiale en matière d'espèces menacées, 11 des 18 espèces sont sur le déclin et seraient menacées de disparition. Cela est dû à plusieurs facteurs tels que le changement climatique global et la surexploitation de leurs zones marines de chasse.

³¹ **UICN** : Union Internationale de Conservation de la Nature

Le manchot royal fait partie des espèces étudiées depuis plus de 20 ans au DEPE. Des séjours d'études et de recherches sont organisés tout au long de l'année aux îles de Crozet, un archipel sub-antarctique du sud de l'océan Indien qui constitue l'un des cinq districts des TAAF. Les biologistes ont recourt souvent à des bio-loggers spécifiques attachés au dos du manchot (Figure 2.6 (b)) dans le but d'étudier la physiologie de la plongée du manchot royal, sa thermorégulation sociale, ses dépenses énergétiques et ses stratégies de chasse (Handrich *et al.*, 1997 ; Halsey *et al.*, 2007 ; Halsey *et al.*, 2008 ; Groscolas *et al.*, 2010).



(a)



(b)

Fig. 2.6. (a) Manchot en phase de plongée - (b) Exemple de bio-logger attaché au dos d'un manchot

♦ Les blaireaux

Le Blaireau européen (*Meles meles* en latin) est la deuxième plus grosse espèce de Mustélidés d'Europe. Il est reconnaissable aux bandes longitudinales noires qu'il porte sur le museau (Figure 2.7 (a)). Son corps est trapu et peut atteindre 90 cm de long pour une vingtaine de kg. Cet animal, nocturne et omnivore, est capable de construire de vastes galeries (terriers) familiales dans le sol. L'idée d'utiliser des bio-loggers attachés à cet animal (Figure 2.7 (b)) typiquement forestier est d'étudier l'effet de la fragmentation de son paysage (intensification de l'agriculture ou de l'urbanisation) sur son comportement de recherche alimentaire, la taille de son territoire et sa survie. Plus précisément, il s'agit d'étudier l'organisation spatiale et temporelle des comportements des blaireaux, conjointement avec les dépenses énergétiques qui leur sont associées (Macdonald et Newman, 2002 ; Bodin *et al.*, 2006).



(a)



(b)

Fig. 2.7. (a) Blaireau - (b) Bio-logger attaché au cou d'un blaireau

2.3.3. Prototypé final à l'issue du projet

Nous avons envisagé un prototype qui rassemble trois principales technologies : une triade composée de capteurs proprioceptifs (un accéléromètre, un magnétomètre et un gyromètre triaxiaux), un système de localisation absolue par satellites (GPS) (lorsqu'il est nécessaire de l'activer) et un système d'acquisition de données (*logger*) adapté à l'animal. D'autres types de capteurs (capteur de température, capteur de pression, capteur de lumière ou ECG) pourront être associés à ce bio-logger selon les besoins de l'utilisateur. La figure 2.8 présente le diagramme bloc simplifié du prototype envisagé.

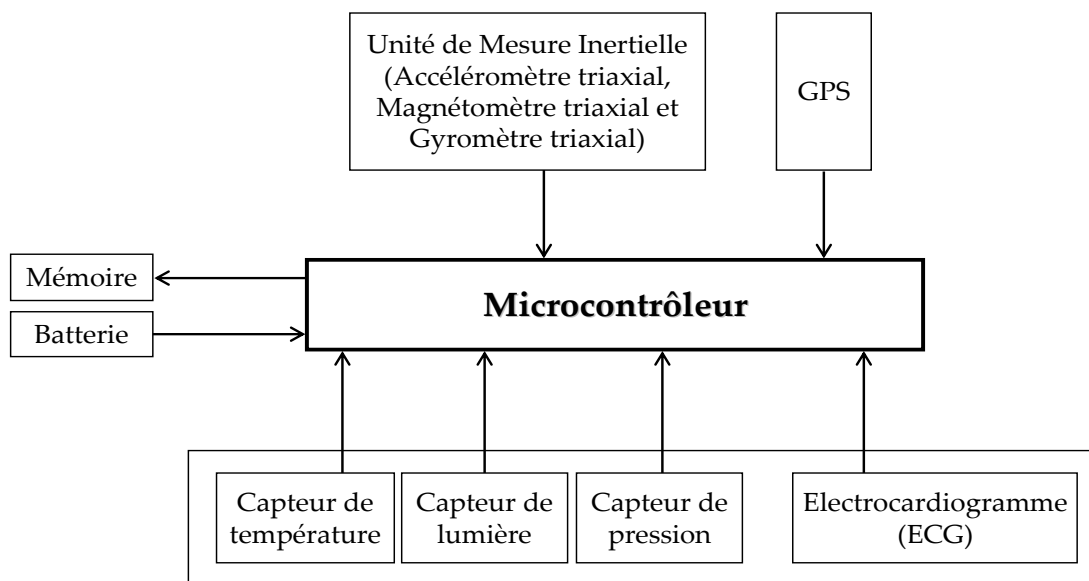


Fig. 2.8. Diagramme général du bio-logger

Ce système doit être capable d'enregistrer les paramètres biologiques (mouvement du corps ou attitude) et les signaux électriques (ECG) à des fréquences d'échantillonnage élevées (30-500 *Hz*). Si l'utilisation en laboratoire d'un tel système est relativement peu contraignante, l'application en milieu extérieur nécessite de résoudre divers problèmes d'autonomie en énergie (faible consommation) et en mémoire (compression des données et grande mémoire), tout en miniaturisant l'appareillage à l'extrême. Cela est particulièrement vrai pour le suivi d'un animal sauvage de petite taille qui évolue dans son milieu pendant plusieurs mois et dont le comportement ne doit pas être perturbé.

Le premier prototype simplifié de ce nouveau bio-logger est en cours de finalisation (calibration et test) en collaboration avec le **LIP**³² de l'**ENS**³³. Il intègre pour le moment uniquement une unité inertielle, mais constitue déjà une avancée par rapport aux *loggers* du même genre sur le marché (voir plus haut le *Daily Diary* proposé dans (Wilson *et al.*, 2008)). Ce bio-logger intègre en effet, en plus des accéléromètres et des magnétomètres triaxiaux, un gyromètre triaxial pour mesurer les vitesses angulaires du corps de l'animal.

³² **LIP** : Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme

³³ **ENS** : Ecole Normale Supérieure de Lyon

2.4. Estimation de l'attitude d'un corps rigide à partir de capteurs inertiels et magnétiques

Le problème de l'estimation de l'attitude d'un corps rigide a été à l'origine de nombreux travaux depuis les années 1960 dans des domaines variés qui requièrent souvent une information précise de l'attitude afin de réaliser des objectifs bien définis. Si nous considérons un corps rigide dans l'espace tel que ses axes principaux coïncident avec les axes d'un système de coordonnées mobiles (B), alors le problème fondamental de la détermination de l'attitude consiste à spécifier l'orientation des axes de (B) par rapport à un système de coordonnées fixes (N) (souvent lié à la terre).

2.4.1. Etat de l'art et domaines d'application

2.4.1.1. Les véhicules aériens autonomes

Un véhicule aérien autonome (**UAV**³⁴), appelé encore drone, est un aéronef sans pilote humain à bord (Figure 2.9). Les drones sont souvent utilisés dans des missions de surveillance, renseignement ou même intervention. Leurs premières utilisations datent des années 1916 et depuis cette époque différentes catégories de drones ont été conçues (Guerrero-Castellanos, 2008 ; Pflimlin, 2006). Le perfectionnement de ces véhicules implique la résolution de plusieurs problèmes concernant principalement la conception d'une commande en temps réel performante (Guerrero-Castellanos *et al.*, 2007). Ainsi, des informations fiables sur son état dans l'environnement qui l'entoure sont requises. Lorsque les états ne sont pas directement mesurables, une estimation s'avère nécessaire (Guerrero-Castellanos *et al.*, 2005).



Fig. 2.9. Exemples de drones aériens

Cela est vrai lorsqu'il s'agit de la reconstruction de l'attitude (roulis, tangage et lacet), information indispensable pour la stabilisation de l'assiette et de l'efficacité de la sustentation du mobile, puis pour le maintien du cap, par exemple. Ainsi, une commande en attitude a pour objectif de maintenir optimales l'équilibre et la direction de vol du mobile. Les capteurs de base les plus utilisés sont les gyromètres, les accéléromètres et les magnétomètres. Afin d'affiner l'assiette, le positionnement et la direction du drone, les informations de la centrale d'attitude sont souvent fusionnées en temps réel à des

³⁴ **UAV** : Unmanned Aerial Vehicle

mesures issues de GPS, capteurs de vitesses, baromètre/altimètre (déplacements suivant l'axe z), et caméra vidéo (Hong, 2003 ; Gebre-Egziabher *et al.*, 2004 ; Mahony *et al.*, 2008 ; Martin et Salaün, 2010).

Notre cas d'étude sur l'animal nous impose de choisir uniquement une unité inertielle à base d'accéléromètres, magnétomètres et gyromètres pour reconstruire l'attitude de l'animal. L'information GPS peut s'avérer utile sauf qu'il est souvent difficile de la recueillir sur un animal marin, par exemple, qui passe une grande partie du temps au cours de ses déplacements sous l'eau. Les capteurs de vitesse peuvent constituer aussi une information complémentaire mais leur utilisation reste difficile sur les animaux marins par exemple puisqu'ils gênent leurs déplacements.

Nous rappelons aussi que le style de mouvement chez l'animal peut varier aussi bien en direction et en vitesse de façon très rapide et imprévisible alors que sur les véhicules aériens, le vol est souvent stationnaire (ou quasi-stationnaire).

2.4.1.2. Les robots et véhicules terrestres

La navigation autonome d'un robot mobile (Figure 2.10) sur tous les types de terrains constitue un défi technologique de plus en plus recherché dans notre société actuelle. Les applications sont diverses, soit dans l'exploration des zones fermées au public soit pour épargner la réalisation de certaines tâches essentielles aux personnes habituellement concernées. Le degré d'autonomie est mis à rude épreuve lorsque le robot mobile doit évoluer dans un environnement naturel, dynamique et difficilement modélisable, tout en restant fiable sur des missions de très longue durée. Il est de ce fait impératif de caractériser au mieux cet environnement, par des outils de perception adaptés, pour réaliser des déplacements de façon autonome.

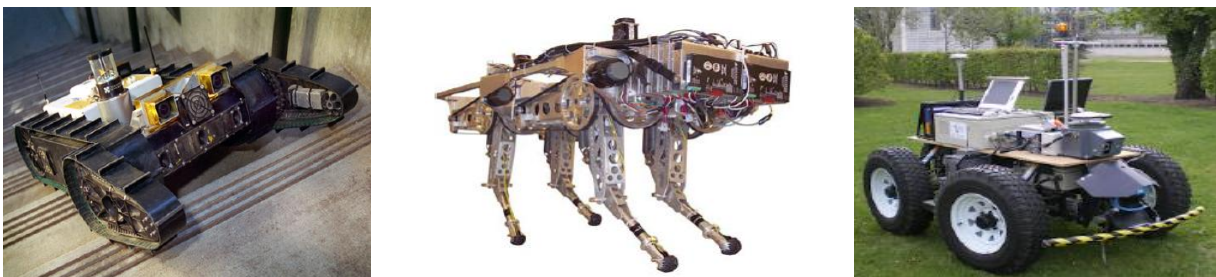


Fig. 2.10. Exemples de robots et véhicules terrestres

Une unité inertielle, est l'une des solutions qui participe à la perception de cet environnement et à l'alimentation des algorithmes de fusion de données (Vaganay *et al.*, 1993 ; Roumeliotis *et al.*, 1999). L'attitude reste toujours une information primordiale au robot lui permettant de se localiser dans son environnement (Hogg *et al.*, 2002 ; Singh et Waldron, 2005 ; Estrada-Sanchez *et al.*, 2008 ; De Laubier, 2008). Les unités de mesures inertielles sont souvent associées à d'autres capteurs comme un odomètre, un GPS, un capteur de vitesse ou un capteur de vision (Slimi *et al.*, 2008). Il est donc possible d'obtenir en plus des informations telles que la vitesse par rapport au sol, la distance

parcours ou le nombre de tours. Ces données constituent des sources de complémentarité dans les algorithmes d'estimation de l'attitude et pour la reconstruction du parcours et de la position actuelle (navigation à l'estime=*dead reckoning*). A part la possibilité d'utiliser une unité inertielle pour reconstruire l'attitude chez l'animal, les solutions relatives à l'ajout de capteur de vitesse, de capteur de vision, d'odomètre et de GPS restent difficiles à utiliser vu la nature de notre application.

Chez l'animal à vie terrestre, le problème majeur reste la reconstitution de la vitesse. Ce type de locomotion où le contact avec le sol est épisodique, et où le milieu d'évolution ambiant, l'air, ne permet pas l'utilisation de capteur de vitesse performant comme en milieu aquatique, interdit les types de mesures accessibles aux drones terrestres ou aquatiques. Trois approches restent néanmoins envisageables pour reconstituer leur vitesse de déplacement : (1) par l'intégration de l'accélération propre, issue de l'utilisation d'une centrale inertielle seule, (2) par un GPS seule, (3) par une approche biologique basée sur l'estimation de la vitesse par le pas, espèce par espèce. Ou une combinaison des trois approches. Nous reviendrons sur ces considérations plus longuement au cours du chapitre 5.

2.4.1.3. Les véhicules marins

Les structures de ces systèmes sont adaptées à l'environnement marin. Il existe différentes catégories de véhicules marins (autonomes ou non autonomes) tels que les navires, les voiliers, les catamarans et les engins sous-marins (**AUV**³⁵) (Figure 2.11). Ces systèmes trouvent leurs applications dans le domaine militaire, civil, recherche etc. Les développements technologiques des systèmes embarqués de positionnement et de navigation ont permis d'améliorer la sûreté de leurs missions en mer tels que le guidage, la commande et la navigation.



Fig. 2.11. Exemples de véhicules marins

L'exécution de ces missions exige souvent le recourt à des informations essentielles telle que l'attitude. Cette donnée, obtenue souvent à partir de centrale inertielle, reste jusqu'à nos jours un problème majeur ouvert pour la navigation, soit des bateaux (Tanaka et Nishifuji, 1996 ; Vik et Fossen, 2000 ; Elkaim, 2001, Wang et Jin, 2009) soit des véhicules sous-marins (Yun *et al.*, 1999 ; Morgado *et al.*, 2009). Les centrales inertielles

³⁵ **AUV** : Autonomous Underwater Vehicle

utilisées sont plus volumineuses et peuvent être couplées à d'autres capteurs tels que des gyromètres laser (très précis), des GPS ou des baromètres. Ces informations complémentaires sont utilisées dans les algorithmes d'estimation de l'attitude ou de la position. Notons que la taille importante de ces capteurs est particulièrement inadaptée à notre application à l'animal.

2.4.1.4. La capture du mouvement humain

La capture de mouvement humain consiste à mesurer la position et/ou l'orientation des membres d'un acteur réel selon une fréquence d'échantillonnage qui dépend du système de capture utilisé (Manamanni *et al.*, 2005). Différents systèmes de capture de mouvements humains existent de nos jours selon la technologie utilisée. On distingue ainsi trois groupes : les systèmes optiques, mécaniques et magnétiques (Salmeron-Quiroz, 2007). Bien que ces systèmes possèdent de grandes précisions (de l'ordre du millimètre), ils sont souvent chers et restreints au niveau de l'espace de mesure (pour les systèmes optiques) et sont limités par des contraintes mécaniques (pour les systèmes mécaniques) et magnétiques (pour les systèmes magnétiques). Récemment, l'apparition de capteurs MEMS a permis de développer des systèmes portables et ergonomiques, basés sur des centrales d'attitude. Cette technique consiste à considérer le corps humain comme une chaîne de segments articulée. Les modules de capteurs sont positionnés sur chaque segment du corps humain, assimilé chacun à un corps rigide (Figure 2.12).



Fig. 2.12. Modules de capteurs attachés aux segments humains

L'estimation de l'attitude à base de capteurs inertiels et magnétiques a été utilisée dans des applications en relation avec le domaine biomédical (rééducation par exemple) (Zhou *et al.*, 2008 ; Rotenberg *et al.*, 2007), la réalité virtuelle (interaction homme-machine) (Gallagher *et al.*, 2004 ; Yun et Bachmann, 2006), ou la biomécanique (évaluation du travail mécanique) (Luing *et al.*, 2007 ; Liu *et al.*, 2009). Nous sommes là évidemment plus

près d'une application à l'animal, bien qu'ici la question de la reconstitution des mouvements du corps par rapport au milieu ne soit pas abordée.

2.4.1.5. La robotique médicale

Ces dernières années, un grand intérêt a été porté à l'estimation de l'attitude dans les applications médicales (chirurgie mini-invasive) à l'aide de technologies de détection inertielle et magnétique (Figure 2.13).



Fig. 2.13. Unité de mesure inertielle attachée à un robot médical

L'idée est d'équiper les appareils médicaux d'unité inertielle afin d'obtenir une information continue sur leur orientation ce qui permet par exemple au chirurgien de garder un suivi précis et en temps réel des instruments chirurgicaux à l'intérieur du corps humain pendant une opération. Quelques travaux ont été proposés dans le cadre de la microchirurgie vitréo-rétinienne (Ang *et al.*, 2007), des examens médicaux en laparoscopie (Ren et Kasanzides, 2009) ou pour les traitements de radiothérapie pour localiser les volumes des tumeurs dans les tissus (Bandala et Joyce, 2008 ; Farahmand *et al.*, 2009).

2.4.1.6. Estimation de l'attitude, une nouvelle application en Bio-logging

Les avancées technologiques au niveau du développement et de la miniaturisation des capteurs ont donc permis de concevoir des bio-loggers capables de reconstituer l'orientation du corps par rapport aux deux angles de son assiette (roulis et tangage), ou les trois angles de son attitude (roulis, tangage et lacet). L'étude de cette problématique est relativement récente dans les applications du *Bio-logging* (depuis les années 2000). L'attitude d'un animal, appelée encore posture, nous informe généralement sur l'orientation spatiale de ce dernier. Récemment, plusieurs travaux de recherches en *Bio-logging* se sont intéressés à cette notion vue son importance et les informations qu'elle peut nous apporter sur les activités quotidiennes et les dépenses énergétiques de l'animal. Chacun de ces travaux utilise un bio-logger et des méthodes spécifiques pour évaluer la variation de l'attitude.

Dans (Johnson et Tyack, 2003 ; Tyack *et al.*, 2005 ; Miller *et al.*, 2004), les auteurs s'intéressent à mesurer l'attitude chez différentes espèces de baleines, un bio-logger étant fixé au dos de ces animaux marins (Figure 2.14). L'approche proposée utilise une combinaison de capteurs formée par un accéléromètre et un magnétomètre triaxiaux afin d'en déduire la variation temporelle de l'orientation spatiale. Ce changement d'attitude est exprimé en utilisant les angles d'Euler (roulis, tangage et lacet).



Fig. 2.14. Bio-logger contenant un accéléromètre et un magnétomètre triaxiaux, attaché à une baleine

Une hypothèse simplificatrice est établie dans ces travaux. L'idée est de supposer que l'animal se déplace à une vitesse constante sur un pas de temps donné (généralement de l'ordre de la seconde), ce qui conduit à considérer que son accélération propre a est nulle. Partant de l'idée que l'accéléromètre mesure à tout instant la somme de la gravité G et de l'accélération propre de l'animal a , l'hypothèse établie implique que dans ce cas la mesure moyenne de l'accéléromètre f sur ce pas de temps représente uniquement la projection du vecteur de la gravité. Vue l'hypothèse, il devient facile d'extraire les angles de roulis et tangage à partir de l'équation théorique de mesure d'un accéléromètre (1.38) tout en remplaçant $M_N^B(q)$ par $M_N^B(\varphi, \theta, \psi)$, exprimée dans (1.29). Connaissant les mesures du magnétomètre h et les angles de tangage et roulis, l'angle du lacet peut être déduit en utilisant (1.40) (de la même façon $M_N^B(q)$ est remplacée par $M_N^B(\varphi, \theta, \psi)$). Cette méthode est démontrée en annexe B.4.

Une approche similaire a été proposée dans (Elkaim *et al.*, 2006 ; Elkaim *et al.*, 2008). Les auteurs s'intéressent à estimer l'attitude chez l'éléphant de mer (*Mirounga Leonina*) pendant les phases de plongée (Figure 2.15). L'attitude complète en 3D, représentée ici sous forme de quaternion, est reconstruite à partir de mesures provenant encore une fois d'accéléromètre et de magnétomètre triaxiaux. La même hypothèse que celle établie dans (Johnson et Tyack, 2003 ; Mitani *et al.*, 2003) est considérée dans ces travaux. En effet les auteurs supposent que l'animal se déplace à des accélérations totales f , mesurées par l'accéléromètre, proches de la gravité ce qui conduit à négliger l'effet de l'accélération

propre a devant la gravité G dans (1.38) ($\|a\| \ll \|G\|$). Cela revient à dire que le mouvement de l'animal est soit statique soit quasi-statique.



Fig. 2.15. Bio-logger attaché à un éléphant de mer

En se basant sur l'hypothèse établie précédemment, l'algorithme d'estimation de l'attitude proposé constitue une résolution du problème de Wahba (Wahba, 1965). Ce dernier a été proposé pour la première fois pour l'estimation de l'attitude des véhicules spatiaux. Sa formulation basique se résume dans la question suivante :

A partir de deux (ou plus) vecteurs non colinéaires et non nuls (appelés aussi vecteurs de mesures ou d'observation) mesurés dans le système de coordonnées mobiles (B) et déjà connus dans le système de coordonnées fixes (N), est-il possible de déterminer l'attitude ?

Plusieurs vecteurs d'observation existent dans la littérature. Ceux considérés dans ce travail sont évidemment le champ magnétique terrestre et le champ de gravité. Leurs projections dans le système de coordonnées mobiles (B) sont données, respectivement, par l'accéléromètre et le magnétomètre. A l'aide d'un algorithme de moindres carrés itératifs, combinant ces mesures données dans (B) et (N), une solution optimale a été proposée à ce problème (Elkaim *et al.*, 2006). Cette solution est basée sur la linéarisation du problème d'estimation de l'attitude dans le système de coordonnées fixes (N). De cette formulation, il en résulte une équation de mesure linéaire facile à résoudre à l'aide d'un algorithme de moindres carrés itératifs (voir chapitre 3, section 3.3.1.3).

Le calcul de l'attitude a été également abordé dans (Watanabe *et al.*, 2005 ; Sato *et al.*, 2003) pour suivre les différentes activités et le comportement de quelques animaux marins et terrestres, le cas du chat par exemple (Watanabe *et al.*, 2005). Le bio-logger utilisé, à base d'accéléromètre uniquement, est attaché au cou de l'animal à l'aide d'un collier (Figure 2.16). Rappelons que la méthode utilisée dans (Watanabe *et al.*, 2005) ne permet de mesurer que les deux angles d'assiette (roulis et tangage), l'ajout d'un magnétomètre étant nécessaire pour accéder au lacet. L'accéléromètre mesure en réalité la somme de l'accélération propre de l'animal (traduisant le changement de mouvement) et celle de la

gravité. Une transformée de Fourier rapide est appliquée à ces mesures dans le but de déterminer les fréquences des mouvements particuliers (recherche alimentaire, repos, courses, etc.).

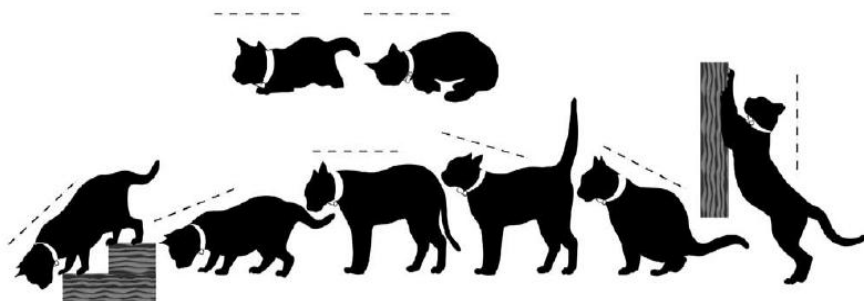


Fig. 2.16. Bio-logger attaché au cou du chat à l'aide d'un collier

Le principe d'estimation de l'attitude est d'appliquer un filtre passe-bas (IFDL³⁶) (Watanabe *et al.*, 2005) aux mesures enregistrées par le capteur. La fréquence de coupure de ce filtre est réglée en tenant compte de la transformée de Fourier rapide effectuée. Ce filtre permet ainsi d'éliminer l'effet des accélérations propres (les hautes fréquences du signal résultant des impulsions musculaires de l'animal) et laisse uniquement la composante décrivant la projection de la gravité. Cette information est utilisée par la suite pour extraire les angles de roulis φ et tangage θ (de la même façon $M_N^B(q)$ est remplacée par $M_N^B(\varphi, \theta, \psi)$). L'idée d'utiliser un filtre passe-bas sur les mesures de l'accéléromètre a été reprise dans (Goldbogen *et al.*, 2006). Des équations mathématiques directes sont utilisées par la suite pour déduire les deux angles de l'assiette.

L'utilisation des accéléromètres et des magnétomètres triaxiaux pour estimer l'orientation spatiale d'un animal a été reprise aussi récemment dans les travaux de Wilson (Wilson *et al.*, 2008 ; Shepard *et al.*, 2008) à travers le calcul des angles d'Euler. Notons que le bio-logger conçu a été attaché à plusieurs espèces animales telles que le blaireau et le chien (Figure 2.17). L'approche proposée consiste à utiliser premièrement les mesures provenant de l'accéléromètre pour calculer les angles de roulis et tangage. Ces mesures sont échantillonnées à des fréquences variables selon l'application (16 et 32 Hz). De la même façon, les auteurs essaient tout d'abord de séparer les mesures du capteur en deux termes : l'accélération gravitationnelle (statique) et celle due au mouvement du corps de l'animal (dynamique). Afin d'extraire les composantes du premier terme ou encore la projection de la gravité dans (B) (représentées par le terme $M_N^B(\varphi, \theta, \psi)G$), une moyenne déroulante des accélérations totales f mesurées (suivant les trois axes) par le capteur sur une période temporelle (une ou 2 sec) est établie. Les valeurs obtenues de

³⁶ IFDL : IGOR Filter Design Laboratory

l'accélération statique ($M_N^B(\varphi, \theta, \psi)G$) sont utilisées pour déduire les angles de roulis φ et tangage θ (de la même façon $M_N^B(q)$ est remplacée par $M_N^B(\varphi, \theta, \psi)$). Connaissant les mesures du magnétomètre h et les angles de tangage et roulis, l'angle du lacet peut être déduit en utilisant (1.40) (de la même façon $M_N^B(q)$ est remplacée par $M_N^B(\varphi, \theta, \psi)$).

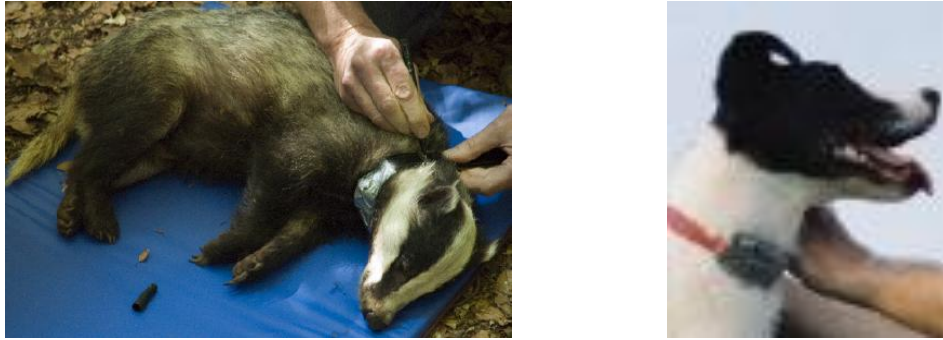


Fig. 2.17. Bio-logger attaché à un blaireau et un chien

2.4.2. Discussion

Notre intérêt s'est porté principalement dans les paragraphes précédents aux domaines de recherche et d'application où l'objectif est l'estimation de l'attitude d'un corps en mouvement, en portant une attention particulière au domaine du Bio-logging.

Les domaines de la robotique aérienne, terrestre ou marine et les capteurs proposés pour reconstruire l'attitude du corps nous mènent à retenir uniquement trois capteurs (les accéléromètres, les magnétomètres et les gyromètres) pour utiliser leurs mesures dans nos algorithmes d'estimation de l'attitude. En effet, les informations issues de ces capteurs restent toujours mesurables lorsqu'ils sont attachés au corps de l'animal. L'enregistrement de ces données ne dépend pas de l'environnement où se trouve l'animal. D'autres types de capteurs sont souvent associés aux algorithmes d'estimation de l'attitude dans ces domaines tels que les capteurs de vitesse, les modules GPS, les capteurs de vision, etc.

- Il s'avère qu'une information sur la vitesse de l'animal est souvent difficile à obtenir, les raisons étant différentes pour les animaux aquatiques ou terrestres. En milieu terrestre, la mesure de la vitesse par rapport au sol (ou à l'air) n'est pas accessible directement par un capteur. En milieu aquatique, il existe des capteurs de vitesse miniaturisés, mais leur calibration est difficile et ils vont introduire des effets de traîne importants. Comme cela a déjà été évoqué, l'utilisation d'un GPS reste inadaptée pour un grand nombre d'espèces marines ou terrestres.

- Nous rappelons aussi que le style de mouvement observé sur les robots volants, terrestres ou marins est plus simple que celui d'un animal. Ce dernier peut bouger son corps très rapidement et dans des directions très variées sur de petits intervalles de temps ce qui engendre une variation brusque et aléatoire de son attitude. Les situations de mouvements observées dans le cas des humains sont évidemment plus appropriées et les

solutions proposées en matière de capteurs (centrale d'attitude ou unité inertielle) sont envisageables sur l'animal.

- Nous remarquons aussi que selon le type du milieu d'évolution du mobile, il est possible d'obtenir des informations pertinentes qui peuvent servir par la suite à la reconstitution de la position de l'animal. Pour les véhicules aériens, les déplacements suivant l'axe Z sont accessibles à l'aide d'altimètre par exemple alors que pour des applications marines, cette information est donnée de façon encore plus précise par des baromètres. Les vitesses linéaires de déplacement peuvent être obtenues facilement, surtout pour des applications marines, mais dans ce dernier cas il reste possible d'utiliser un module GPS. Par rapport à notre application sur l'animal, l'usage de ces informations complémentaires, s'il reste possible, pourrait jouer un rôle essentiel dans le calcul de la position.

Un tour d'horizon a été effectué par la suite autour des principales méthodes utilisées en Bio-logging pour reconstruire la posture 3D et l'orientation spatiale chez les animaux. En faisant une simple analogie, il est possible de rapprocher le corps d'un animal (ou plutôt un membre de son corps) à la structure d'un corps rigide. La synthèse établie permet de dégager plusieurs remarques quant aux approches proposées pour estimer l'attitude de ces animaux.

- Les méthodes proposées jusqu'à maintenant par les biologistes sont très pragmatiques et disposent donc de quelques avantages. En effet, elles se basent uniquement sur une fusion de mesures issues d'accéléromètres et de magnétomètres triaxiaux. Ces deux capteurs sont généralement caractérisés par une consommation relativement faible en énergie. Cela permet au bio-logger d'enregistrer ces mesures sur des périodes temporelles suffisamment longues afin de reconstruire de façon approchée les différentes postures de l'animal. De même, ces méthodes paraissent simples et faciles à appliquer et peuvent même être programmées en temps réel. Cela dépend de la durée d'enregistrement, de la fréquence d'échantillonnage et de l'autonomie énergétique des batteries qui équipent le bio-logger. En dépit de ces avantages, ces approches présentent des limitations et des faiblesses inhérentes aux hypothèses simplificatrices considérées.

- L'hypothèse établie dans (Johnson et Tyack, 2003 ; Elkaim et al., 2006 ; Tyack et al., 2005 ; Miller et al., 2004 ; Elkaim et al., 2008) suppose que l'animal se déplace à des accélérations totales f , mesurées par l'accéléromètre, proches de la gravité. Dans ce cas, l'accélération propre de l'animal est négligeable devant celle de la gravité. Il est raisonnable de penser que pendant les phases dynamiques de l'animal, les méthodes d'estimation de l'attitude utilisées dans ces travaux deviennent inadaptées. Le problème qu'il faut souligner ici est que l'index énergétique directement dérivé de la mesure de l'accélération propre est fortement lié au calcul de l'attitude. L'erreur d'estimation serait plus élevée justement pendant les phases à haute demande énergétique (phases dynamiques).

- L'utilisation d'un filtre passe-bas dans (Watanabe et al., 2005 ; Sato et al., 2003 ; Goldbogen et al., 2006) pour extraire les composantes de la projection de la gravité à partir des mesures de l'accéléromètre est typique à cet égard : en effet le choix de la fréquence de coupure du filtre pour éliminer les hautes fréquences du signal est arbitraire et unique, appliqué tout au long de l'enregistrement, quelque soit le mouvement considéré pour un individu donné.

- L'approximation établie dans (Wilson et al., 2008 ; Shepard et al., 2008) pour déduire la projection de la gravité par une moyenne déroulante souffre sans doute du même handicap, puisque le pas de la moyenne déroulante est lui aussi appliqué tout au long de l'enregistrement. De plus, cette méthode est utilisée indifféremment au cours des différentes activités enregistrées sur le même individu ou sur la même espèce. Par exemple sur des animaux à locomotions différentes : nageur phasique (manchot) ou non (tortue marine), volant ou nageant, avec aussi le cas particulier des espèces terrestres (marche, trot, galop). En effet, le choix de la période temporelle pour effectuer la moyenne déroulante et déduire la projection de la gravité dépendra de tous ces cas de figures intra ou interspécifiques et va déterminer la précision du calcul des attitudes.

- Soyons objectifs, les méthodes citées précédemment sont justifiées et adaptées pour estimer l'attitude de l'animal lorsqu'il s'agit de phases de mouvement statiques ou quasi-statiques (lors des basses fréquences du mouvement). A ce moment l'accéléromètre joue le rôle d'un simple inclinomètre et permet conjointement avec le magnétomètre d'extraire, soit les angles d'inclinaison de l'assiette (roulis et tangage) et d'attitude (lacet en plus) soit le quaternion de rotation. Lors des phases dynamiques du mouvement (lors des hautes fréquences du mouvement), l'utilisation d'accéléromètres et de magnétomètres seuls ne peut pas permettre de reconstruire l'attitude avec précision. Il est probable que pendant les hautes fréquences du mouvement, ces méthodes manquent d'information complémentaire.

- Afin de remédier à ce problème, nous proposons donc d'ajouter une troisième modalité de mesure caractérisée par son aptitude à mesurer l'attitude à des hautes fréquences du mouvement. C'est le gyromètre (voir chapitre 1). Ce capteur a été largement utilisé dans différentes applications qui nécessitent la connaissance d'une information sur l'attitude telles que les drones aériens, les véhicules marins, la biomécanique ou la biomédecine. En outre, l'estimation de l'attitude d'un animal représente un cas particulier d'un problème général d'estimation de l'attitude d'un corps rigide. Le but finalement est de proposer des solutions alternatives à l'estimation de l'attitude pour une application à la recherche en biologie, mais sans délaisser l'objectif de pouvoir les transposer à des domaines industriels d'actualité tels que la robotique aérienne ou marine.

Dans la section suivante, nous passerons donc en revue les principales approches faisant appel à des méthodes basées sur la fusion de mesures inertielles et magnétiques à partir d'accéléromètre, de magnétomètre et de gyromètre triaxiaux.

2.5. Principaux estimateurs d'attitude

L'attitude est une information qui n'est pas directement mesurable lors d'un mouvement quelconque d'un corps rigide. Dans ce cas général, seule une estimation approchée de ce paramètre est possible. Différentes approches ont été appliquées au problème d'estimation de l'attitude, conduisant à une grande variété d'estimateurs utilisant les quaternions, les matrices de rotations ou les angles d'Euler.

Ces estimateurs peuvent être classés en quatre principales familles : 1) celle basée sur *des approches de moindres carrés*, 2) celle basée sur *les filtres de Kalman*, 3) celle basée sur *les observateurs non linéaires*, 4) celle basée sur *les filtres complémentaires* (Crassidis *et al.*, 2007). De nos jours, il est difficile de privilégier une méthode sur une autre et le choix d'une approche doit tenir compte à chaque fois des contraintes de l'application choisie. On se limitera dans cette section à présenter brièvement les principaux travaux de recherche développés dans ce cadre. Cela va permettre de mieux situer par la suite la contribution du présent travail principalement au domaine du *Bio-logging*.

2.5.1. Estimateurs d'attitude basés sur les techniques de moindres carrés

Les techniques de moindres carrés sont parmi les premières méthodes utilisées dans les algorithmes optimaux d'estimation de l'attitude. Ce problème de moindres carrés, appelé encore *problème de Wahba*, date de 1965 (Wahba, 1965). Il peut être défini de la façon suivante :

♦ Problème de Wahba (Guerrero-Castellanos, 2008)

Soient deux ensembles de n vecteurs représentés par $\{\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n\}$ et $\{\vec{b}_1, \vec{b}_2, \dots, \vec{b}_n\}$ où chaque paire (\vec{r}_i, \vec{b}_i) correspond aux coordonnées d'un vecteur \vec{x}_i par rapport aux deux systèmes de coordonnées fixes (N) et mobiles (B). Le problème consiste à trouver la matrice M , qui ramène le premier ensemble dans le second de façon à ce qu'ils coïncident le mieux possible. En termes mathématiques, le problème consiste à trouver la matrice $M \in SO(3)$ qui minimise la fonction coût suivante :

$$J(M) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n \geq 2} a_i \|\vec{b}_i - M\vec{r}_i\|^2 \quad (2.1)$$

où n est le nombre total de mesures et $\{a_i\}$ est un ensemble de poids positifs souvent choisis en se basant sur la fiabilité des mesures correspondantes.

Cette fonction peut être réécrite de la façon suivante :

$$J(M) = \lambda_0 - \text{trace}(MB^T) \quad (2.2)$$

avec

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n a_i \quad ; \quad B = \sum_{i=1}^n a_i \vec{b}_i \vec{r}_i^T \quad (2.3)$$

Il est clair que $J(M)$ est minimisée lorsque $\text{trace}(MB^T)$ est maximisée.

La solution au problème de Wahba est une estimation de l'attitude pour une simple rotation. Les familles de solutions à ce problème consistent à déterminer soit la matrice de rotation M , soit le quaternion optimal q associé à cette matrice. Les premières solutions ont été proposées en 1966 par Farrell et Stuelpnagel dans (Wahba, 1966) et par Wessner, Velman, Brock dans le même papier. Cependant ces solutions sont coûteuses au niveau calcul et ne sont pas bien adaptées aux applications en temps réel. En 1968, Davenport propose une deuxième solution appelée *q-method*, permettant d'estimer le quaternion unitaire optimal q (Davenport, 1968). Il considère la fonction quadratique suivante :

$$\text{trace}(MB^T) = q^T K q \quad (2.4)$$

En conséquence, le problème de Wahba est équivalent à un problème de recherche de la plus grande valeur propre λ_{\max} de la matrice symétrique $K \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$.

$$K \equiv \begin{bmatrix} B + B^T - \text{trace}(B)I_{3 \times 3} & \sum_{i=1}^n a_i \vec{b}_i \times \vec{r}_i \\ \left(\sum_{i=1}^n a_i \vec{b}_i \times \vec{r}_i \right)^T & \text{trace}(B) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Le quaternion optimal, correspondant à la matrice de rotation optimale M , est le vecteur propre normalisé q_{\max} de K associé avec la valeur propre λ_{\max} . La plus grande valeur λ_{\max} est obtenue en résolvant analytiquement l'égalité $Kq_{\max} = \lambda_{\max} q_{\max}$. Cependant cette méthode reste aussi complexe. Cela a conduit au développement d'un autre algorithme très populaire appelé **QUEST**³⁷ qui consiste à résoudre numériquement l'équation $\det(K - \lambda I_{4 \times 4}) = 0$ (Shuster, 1981). Théoriquement, **QUEST** est moins robuste que *q-method*, mais clairement plus rapide. D'autres solutions alternatives au problème de Wahba ont été proposées, comme par exemple : **SVD**³⁸, **FOAM**³⁹, **ESOQ**⁴⁰, **ESOQ-1** ou **ESOQ-2** (Markley, 2000).

³⁷ **QUEST** : Quaternion ESTimator

³⁸ **SVD** : Singular Value Decomposition

³⁹ **FOAM** : Fast Optimal Attitude Matrix

⁴⁰ **ESOQ** : Estimator of the Optimal Quaternion

En conclusion, les méthodes basées sur les techniques de moindres carrés pour la résolution du problème de Wahba nécessitent toujours la connaissance d'au moins deux vecteurs de mesures exprimés dans deux systèmes de coordonnées différents. Pour notre application, comme nous utilisons des informations issues d'accéléromètres et de magnétomètres, alors la gravité G et le champ magnétique m , exprimés dans (N) , seront considérés comme vecteurs de mesures. Cependant, il est difficile d'extraire surtout la projection de G exprimée dans (B) à partir des mesures de l'accéléromètre à cause de l'effet des accélérations propres a mesurées par ce dernier au cours du mouvement du mobile, le cas de l'animal par exemple (Elkaim *et al.*, 2006). Cela rend difficile l'utilisation unique de telles approches pour résoudre notre problématique surtout que nous nous intéressons à reconstituer l'attitude de l'animal avec une précision indépendante de la dynamique de ses mouvements.

2.5.2. Estimateurs d'attitude basés sur les filtres de Kalman

♦ Définition d'un Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman doit son nom à Rudolf Kalman (Kalman, 1960). Ce filtre, à réponse impulsionnelle infinie, estime les états d'un système dynamique linéaire à partir d'une série de mesures incomplètes ou bruitées. Le filtre de Kalman est considéré comme un estimateur récursif. Cela signifie que pour estimer l'état courant, seul l'état précédent et les mesures actuelles sont nécessaires. L'historique des observations et des estimations n'est pas ainsi requis. Le filtre de Kalman a deux phases distinctes : Prédiction et Mise à jour. La phase de prédiction utilise l'état estimé de l'instant précédent pour produire une estimation de l'état courant. Dans l'étape de mise à jour, les observations de l'instant courant sont utilisées pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise (Welch, 2001).

Le filtre de Kalman est un estimateur qui a été largement utilisé dans le domaine de la navigation et plus précisément dans le contexte de l'estimation de l'attitude. Le modèle du processus de ce filtre correspond généralement à l'équation cinématique d'un corps rigide, basée sur les mesures de la vitesse angulaire issues d'un gyromètre. La structure de cette équation varie selon la représentation d'attitude utilisée (les équations les plus utilisées sont de trois types à savoir (1.7), (1.27) ou (1.30)). Le modèle de mesure de ce filtre est souvent obtenu par le biais des équations de mesures d'accéléromètre, magnétomètre ou inclinomètre par exemple ((1.38) et (1.40)). L'approche classique consiste à modéliser la dynamique du processus comme un processus stochastique contenant un vecteur de bruit additif (biais et bruit sur les mesures du gyromètre). De la même façon, le vecteur de mesure est aussi pollué par un bruit souvent considéré blanc gaussien centré. Finalement, le modèle du processus conjointement avec les équations de mesures donnent lieu à un modèle d'état variable dans le temps (modèle de Kalman). Les propriétés statistiques du

bruit lié à l'état et du bruit lié aux mesures doivent être utilisées afin de régler le filtre de façon optimale (réglage des matrices de variance et de covariance).

De nombreuses approches, basées sur l'utilisation des filtres de Kalman, ont été développées dans le cadre de l'estimation de l'attitude. Cependant, on se limite ici à citer quelques références de la littérature qui sont relativement récentes. Le filtre de Kalman a été appliqué dans (Roetenberg *et al.*, 2007) pour reconstruire la posture (sous forme de matrice de rotation) des membres humains lors des mouvements quotidiens. La structure du filtre est complémentaire puisqu'elle fusionne trois mesures issues d'une unité inertielle. L'idée consiste à implémenter ce filtre de telle façon que les mesures provenant des accéléromètres et des magnétomètres soient exploitées pour reconstruire l'attitude lors des mouvements à basses fréquences (l'accélération propre du corps rigide est négligeable devant la gravité), alors que les mesures fournies par les gyromètres sont plutôt requises pour les mouvements à hautes fréquences. Cette idée a été reprise lors des travaux proposés dans (Zhu *et al.*, 2007 ; Jurman, 2007 ; Batista *et al.*, 2010) en développant des **AHRS**⁴¹ capables d'estimer l'attitude sous forme d'angle d'Euler. La méthode synthétisée dans (Gebre-Egziabher *et al.*, 2000) intègre de plus des mesures GPS pour quantifier la part d'accélération propre dans les mesures de l'accéléromètre. Cela joue un rôle dans l'amélioration de la précision de l'estimation de l'attitude exprimée sous forme de quaternion unitaire.

Il arrive souvent que le modèle du processus soit non linéaire, par exemple si nous voulons estimer d'autres états, tels qu'un biais gyrométrique ou accélérométrique. Dans ce cas, il est possible de généraliser le filtre de Kalman en utilisant des formes linéarisées de l'opérateur d'observation et du modèle d'évolution. Ce filtre est appelé *filtre de Kalman étendu* (**EKF**⁴²) (Brown et Hwang, 1997). L'utilisation de cette version modifiée du filtre est très répandue en robotique mobile (Vaganay *et al.*, 1993), la capture de mouvement (Yun et Bachmann, 2006 ; Sabatini, 2006) et la robotique aérienne (Bijker et Steyn, 2008 ; Bonnabel, 2007 ; Bonnabel, 2009). Il existe plusieurs implémentations différentes de EKF, en fonction de la forme de représentation de l'attitude utilisée dans le vecteur d'état et la façon avec laquelle le vecteur de sortie est introduit dans le filtre. On distingue principalement le *filtre de Kalman étendu additif* (**AEKF**⁴³) (Bar-Izthack *et al.*, 1991 ; Choukroun *et al.*, 2002) et le *filtre de Kalman étendu multiplicatif* (**MEKF**⁴⁴) (Lefferts *et al.*, 1982 ; Markley, 2003). Ces algorithmes ont été proposés afin de résoudre des problèmes liés à la singularité et la redondance de quelques représentations de l'attitude.

En conclusion, l'avantage majeur de l'utilisation des différents filtres de Kalman par rapport à la technique des moindres carrés est l'intégration d'une troisième modalité de mesure, via le gyromètre. Cela est possible en utilisant l'équation cinématique d'un corps rigide. Comme cela a été montré précédemment, l'adjonction de mesures provenant d'un

⁴¹ **AHRS** : Attitude and Heading Reference System

⁴² **EKF** : Extended Kalman Filter

⁴³ **AEKF** : Additive Extended Kalman Filter

⁴⁴ **MEKF** : Multiplicative Extended Kalman Filter

gyromètre s'avère déterminante pour l'estimation précise de l'attitude au cours des phases dynamiques du mouvement. Par conséquent, cette structure de filtre pourrait répondre à nos besoins en *Bio-logging*, bien évidemment pour reconstituer les postures de l'animal en liberté. Cependant, l'inconvénient d'une telle approche est qu'il est difficile de garantir la convergence globale du filtre en raison de l'approximation linéaire du modèle de processus non linéaire (Brown et Hwang, 1997). De plus, le calcul à l'intérieur de ce filtre est souvent plus difficile (choix des matrices de bruits sur l'état et sur les mesures) et plus coûteux en temps d'exécution (calcul de la matrice de covariance et de la matrice de gains à chaque pas de calcul).

2.5.3. Estimateurs d'attitude basés sur les observateurs non linéaires

♦ Définition d'un observateur d'état

En automatique, un observateur d'état est une extension d'un modèle écrit sous forme de représentation d'état. Lorsque l'état d'un système n'est pas mesurable, on synthétise un observateur qui permet de le reconstruire à partir du modèle du système dynamique et des mesures d'autres grandeurs. La théorie de l'observateur d'état déterministe a été introduite dans les années soixante par Luenberger pour les systèmes linéaires (Luenberger, 1964). Pour les systèmes non linéaires, l'observation est un domaine d'actualité où la recherche reste très active.

La théorie des observateurs a été proposée récemment comme une solution alternative au filtre de Kalman dans l'estimation de l'attitude. Ces observateurs sont souvent à structures non linéaires en raison des non linéarités présentes dans le problème de l'estimation de l'attitude.

Un premier observateur, tirant profit de l'algèbre des quaternions, a été développé dans (Thienel et Sanner, 2003 ; Guerrero-Castellanos, 2008) pour estimer l'orientation des vaisseaux spatiaux et des drones. L'observateur est construit à partir de l'équation cinématique d'un corps rigide donnée dans (1.27), qui utilise principalement les mesures de vitesses angulaires issues d'un gyromètre. Le terme de correction dans l'observateur est représenté par la différence entre le quaternion estimé et celui mesuré à partir d'une autre source complémentaire (à partir d'accéléromètre et de magnétomètre dans le deuxième papier par exemple). Le biais b présent dans le gyromètre est également estimé afin de corriger les mesures issues de ce capteur. Notons que cette approche dérive de l'observateur proposé dans (Salcudean, 1991). Très récemment, d'autres formes d'observateurs non linéaires exploitant l'algèbre des quaternions ont été élaborées dans (Martin et Salaün, 2007 ; Tayebi, 2008 ; Martin et Salaün, 2010). Ces estimateurs fusionnent les mesures d'une unité inertielle afin de reconstruire la variation du biais dans le gyromètre et le quaternion de mouvement. Les mesures issues de ces capteurs sont complémentaires au niveau fréquentiel. Ainsi les structures d'observateurs proposées

permettent de profiter en même temps des avantages de chaque capteur sur les différentes plages fréquentielles de mouvement.

L'utilisation de la notion d'observation dans le cadre de l'estimation des matrices de rotations a été abordée dans (Laila *et al.*, 2006). L'observateur synthétisé dans ce papier est sous forme discrète et permet d'assurer l'orthogonalité de la matrice de rotation M , une caractéristique importante de ce type de matrices. Cet observateur est construit à partir de l'équation cinématique d'un corps rigide décrite dans (1.7). Notons que la méthode élaborée se limite uniquement à l'utilisation des mesures de vitesse angulaire et d'un seul vecteur d'observation. Ce travail a été poursuivi par d'autres recherches à ce niveau. Dernièrement, l'estimation de la matrice de rotation, à base d'observateurs non linéaires, a été reprise dans le cadre de la robotique aérienne (les drones) (Metni *et al.*, 2006 ; Hamel et Mahony, 2006 ; Mahony *et al.*, 2008 ; Vasconcelos *et al.*, 2008a). Ces méthodes fusionnent les mesures issues d'une unité inertielle et permettent de reconstruire ainsi l'attitude de ces engins volants en temps réel et le biais présent dans les gyromètres. Les estimateurs proposés dans (Mahony *et al.*, 2008 ; Metni *et al.*, 2006 ; Hamel et Mahony, 2006) sont appelés encore filtres complémentaires du fait qu'ils fusionnent les mesures issues des trois capteurs de façon complémentaire.

L'estimation des angles d'Euler par le biais d'observateur est une fenêtre de recherche qui a aussi montré un intérêt récent de la part de la communauté scientifique. Un premier observateur exponentiel à grand gain a été proposé dans (Rehbinder et Hu, 2000) pour estimer l'orientation (angles d'Euler) d'un robot marcheur. L'information sensorielle fournie à cet observateur est issue d'un gyromètre et d'un inclinomètre. Récemment, un observateur à modes glissants a été élaboré pour reconstruire les angles d'Euler lors du mouvement d'un corps rigide à partir de mesures provenant uniquement d'une unité inertielle (El-Hadri et Benallegue, 2009a ; El-Hadri et Benallegue, 2009b).

Afin d'améliorer la qualité de l'estimation de l'attitude au cours de certaines situations, d'autres formes d'observateurs ont été proposées dans la littérature permettant ainsi d'associer des informations complémentaires aux mesures provenant d'une unité inertielle. L'idée principale évoquée dans (Rehbinder et Ghosh, 2003 ; Cheviron *et al.*, 2007 ; Bras *et al.*, 2009) repose sur la fusion de mesures inertielles et d'une technique de vision. Cependant, chaque papier propose une structure différente d'observateur pour estimer les éléments de la matrice de rotation M . L'observateur invariant synthétisé dans (Bonnabel *et al.*, 2006) exploite l'algèbre de Lie pour estimer le quaternion dans le contexte de la navigation inertielle. Cette approche se sert plutôt de la vitesse linéaire (à partir d'un radar Doppler) comme information complémentaire à celle provenant de l'unité inertielle.

Grâce au développement des techniques de localisation par satellite, la technique de fusion INS/GPS à base d'observateurs non linéaires a été suggérée récemment dans plusieurs références de la littérature en relation avec la robotique aérienne (Martin et Salaün, 2008a ; Martin et Salaün, 2008b ; Vasconcelos *et al.*, 2008b ; Hua, 2010). En

effet, l'utilisation d'une mesure GPS permet d'accéder à l'information de la vitesse linéaire du corps rigide lors de son mouvement. Il est parfois intéressant d'intégrer ce type de donnée (lorsque c'est possible) dans les algorithmes d'estimation de l'attitude lorsqu'il s'agit d'un mouvement accéléré sur des périodes temporelles importantes (Hua, 2010). Par rapport à notre application, nous rappelons qu'il n'est pas possible d'utiliser une information GPS en continu dans les algorithmes d'estimation de l'attitude.

2.5.4. Discussion et choix

Une grande variété d'estimateurs construits autour des quaternions, des matrices de rotations ou des angles d'Euler existe dans la littérature. On distingue les approches de moindres carrés, les filtres de Kalman, les observateurs d'état non linéaires et les filtres complémentaires.

Il est clair que l'approche par les techniques de moindres carrées n'est pas toujours adéquate pour être utilisée en Bio-logging. En effet, cette méthode exige la connaissance d'au moins deux vecteurs de mesures exprimés dans deux systèmes de coordonnées différents. Comme nous utiliserons uniquement une unité de mesure inertielle, les seuls capteurs qui peuvent nous fournir ces deux vecteurs sont les accéléromètres et les magnétomètres. Cependant, il n'est possible de déduire le vecteur de mesure à partir de l'accéléromètre que lorsque le corps portant le capteur est dans des phases de mouvement quasi-statiques. Puisque nous nous intéressons aussi à l'estimation de l'attitude au cours des phases dynamiques du mouvement de l'animal, les techniques de moindres carrés ne peuvent pas satisfaire cet objectif.

L'approche par les filtres de Kalman peut remédier à ce problème et offre la possibilité d'intégrer une troisième modalité de mesure qui est le gyromètre. La littérature montre que ce filtre souffre du problème majeur correspondant à l'approximation linéaire du modèle de processus non linéaire (Brown et Hwang, 1997). Cela devient plus apparent au fur et à mesure que le modèle du processus intègre d'autres états à estimer. Ainsi, le système devient fortement non linéaire et à ce moment il est impératif d'utiliser un EKF en ramenant le modèle non linéaire à une forme linéarisable. A cela s'ajoute le calcul plus coûteux en temps d'exécution, du au calcul des matrices de gains et de covariance à chaque pas d'itération. En dépit de ces inconvénients, le filtre de Kalman continue à être bien utilisé dans le domaine de la navigation et surtout en estimation de l'attitude.

L'approche par les observateurs non linéaires (les filtres complémentaires) n'a pas besoin d'une linéarisation du modèle de processus (généralement basé sur l'équation cinématique de mouvement). Ces techniques sont mieux adaptées au système non linéaire et demandent moins de calcul par rapport au filtre de Kalman. Un autre avantage est qu'aucune matrice de covariance n'est calculée. En conclusion, les observateurs donnent un résultat de convergence meilleur que les EKF (Guerrero-Castellanos, 2008).

2.6. L'attitude : information essentielle en énergétique et en *dead reckoning*

Le calcul de l'attitude est l'un des objectifs majeurs dans le projet *NaviMeles* et plus précisément dans ce travail. Nous nous sommes intéressé en premier lieu à cette problématique puisque l'estimation précise de l'attitude nous permet par la suite d'atteindre deux autres objectifs de ce projet : l'évaluation du travail mécanique et des dépenses énergétiques de l'animal pendant ses mouvements quotidiens ainsi que le calcul de sa position après reconstruction de son parcours.

En effet, une fois l'attitude calculée, nous pouvons disposer d'une estimation de l'accélération propre instantanée par divers procédés théoriques (voir ci-dessous), au pas d'échantillonnage des capteurs inertiels. Celle-ci est dénommée par les biologistes *l'accélération dynamique corporelle* ou encore **DBA**⁴⁵. Elle correspond pour le physicien à l'accélération propre du mobile. Dans l'application à l'animal, cette accélération est schématiquement la résultante des forces de propulsion (dérivée du travail musculaire), des forces de frottement et du poids apparent (en milieu aquatique, le poids moins force la d'Archimède). Ainsi, indirectement, l'accélération propre est un reflet de l'activité musculaire de l'animal et du travail mécanique associé. La relation entre la dépense énergétique de l'animal et DBA est encore plus indirecte, car une grande proportion de l'énergie chimique investie par l'organisme dans l'activité locomotrice est perdue sous forme de chaleur. Néanmoins, en utilisant une moyenne de la somme des valeurs absolues des trois composantes axiales du DBA sur un pas d'une à deux secondes, dénommée depuis **ODBA**⁴⁶, Rory Wilson a démontré (sur différentes espèces animales) l'existence d'une bonne corrélation entre cet index de l'accélération propre et la dépense énergétique de l'animal en mouvement sur un tapis roulant (la dépense énergétique étant mesurée par la respirométrie (Wilson *et al.*, 2006 ; Wilson *et al.* 2008 ; Shepard *et al.*, 2008 ; Soresina, 2010)). Comme nous le verrons plus en détail, cette approche reste assez simplificatrice, pour des raisons théoriques et métrologiques. Sans discuter des différentes limites biophysiques, physiologiques et biomécaniques de la relation métabolisme énergétique - dépense locomotrice - dépense mécanique, il existe un raccourci rapide, pour le physicien, entre cet index ODBA (qui ne correspond même pas mathématiquement à une norme vectorielle) et les données brutes calibrées des accéléromètres et des magnétomètres utilisées dans ces applications. En reprenant brièvement les travaux du *Bio-logging* présentés précédemment, nous pouvons remarquer qu'il existe une relation intrinsèque entre l'estimation de l'attitude et celle des trois composantes de l'accélération propre. Par exemple, dans (Watanabe *et al.*, 2005 ; Sato *et al.*, 2003) l'accélération propre donnée par le terme $(M_N^B(\varphi, \theta, \psi) a)$, projetée dans le système de coordonnées mobiles (B) , est extraite en faisant la différence point par point de mesure entre le signal brut de l'accéléromètre et l'accélération statique donnée par le terme $(M_N^B(\varphi, \theta, \psi) G)$ et calculée

⁴⁵ **DBA** : Dynamic Body Acceleration

⁴⁶ **ODBA** : Overall Dynamic Body Acceleration

en utilisant un filtre passe-bas. Par la suite, il devient facile de déduire le vecteur accélération propre a . Cette même procédure a été reprise dans (Wilson *et al.*, 2008 ; Shepard *et al.*, 2008) sauf que le calcul de l'accélération statique ($M_N^B(\varphi, \theta, \psi)G$) est effectuée à l'aide d'une moyenne déroulante. Par souci de rapprochement avec la littérature du *Bio-logging*, nous avons gardé dans ce mémoire le vocable DBA pour représenter la norme vectorielle de l'accélération propre (quelque soit le mode d'estimation des trois composantes du vecteur), qu'il ne faut pas confondre avec l'ODBA. Rappelons une dernière fois que pour passer des trois composantes de l'accélération propre à l'index ODBA, ces auteurs n'utilisent pas un calcul de norme vectorielle.

Un autre aspect très important de l'utilité du calcul de l'attitude apparaît dans la possibilité de déduire la position de l'animal à partir de cette information par une technique de reconstruction de la trajectoire ou *dead reckoning* (Wilson *et al.*, 2007). En effet, les travaux présentés dans (Mitani *et al.*, 2003 ; Elkaim *et al.*, 2006 ; Elkaim *et al.*, 2008 ; Wilson *et al.*, 2007 ; Wilson *et al.*, 2008) utilisent un capteur de vitesse pour mesurer la vitesse de nage et un capteur de pression pour déterminer les profondeurs suivant Z. En se servant des informations de l'attitude (angle de lacet), de la vitesse, de la position suivant Z et de la position précédente, il est possible de déduire la nouvelle position de l'animal.

Une autre façon de reconstituer l'équation de mouvement à partir de l'attitude et de l'accélération propre est théoriquement possible, sans capteur de vitesse (double intégration de l'accélération propre). Cette solution n'a pas été envisagée encore dans la littérature du *Bio-logging*, bien qu'il existe quelques travaux appliqués à l'homme (Ladetto, 2003) se basant sur la reconstitution de la vitesse par intégration de l'accélération propre. Le problème majeur de cette approche réside dans la présence d'une grande dérive au niveau de l'estimation de la position. Cela est dû à la double intégration des erreurs additives commises lors du calcul de l'accélération propre. L'objectif à long terme du projet *NaviMeles*, qui dépasse le cadre de ce travail, est de coupler les données issues de l'unité inertielle à des points GPS peu fréquents afin de recalibrer les estimations de la position. Parallèlement, il est possible de confronter ces estimations à des données biologiques (variation possible de la vitesse dans une gamme biologique connue pour l'espèce étudiée par exemple) afin de corriger encore le calcul de la position.

Il est ainsi clair qu'une estimation imprécise ou erronée de l'attitude engendre par la suite des erreurs sur l'évaluation de la dépense énergétique et sur le calcul de la position. Gardons ici à l'esprit seulement l'idée suivante : la précision de l'estimation de l'accélération propre (DBA) et de la position dépend étroitement et en premier lieu d'une bonne estimation de l'attitude de l'animal en mouvement.

2.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré dans sa première partie à définir la thématique du *Bio-logging*. Ce champ d'application multidisciplinaire entre l'électronique embarquée et

l'étude du comportement de l'animal dans son environnement constitue le cadre du travail développé dans ce livre. Nous avons ainsi présenté à cet effet une synthèse des différentes techniques d'enregistrement de données liées à l'animal ou à son environnement. Le but est de situer nos propres techniques par rapport à ce qui existe dans la littérature.

La deuxième partie de ce chapitre définit le projet *NaviMeles* ainsi que ses principaux objectifs. La reconstitution de la posture de l'animal représentera la problématique principale que nous traiterons dans ce livre. De cette problématique découleront deux autres objectifs essentiels pour les biologistes : l'évaluation d'un index du travail mécanique ou de la dépense énergétique de l'animal en mouvement et le calcul de sa position, ou la reconstitution de son parcours 3D.

Afin de bien mener la problématique centrale, nous avons dressé dans la troisième partie de ce chapitre une étude de l'état de l'art de l'estimation de l'attitude dans divers domaines de la littérature pour arriver à la fin à présenter son application en *Bio-logging*. Cela nous a permis de déduire les limites des méthodes utilisées jusqu'à présent dans ce domaine, qui se basent uniquement sur l'utilisation d'accéléromètre et de magnétomètre. Partant de ces inconvénients, et en faisant le lien avec les autres domaines d'application de l'estimation d'attitude, nous avons conclu qu'il était nécessaire d'ajouter une troisième modalité de mesure, à savoir un gyromètre, pour remédier au problème d'estimation de l'attitude observé pendant les phases dynamiques du mouvement de l'animal.

Dans la quatrième partie, nous avons classé les méthodes de reconstruction de l'attitude, basée sur l'utilisation d'une unité inertielle, en quatre groupes principaux. Notre choix s'est porté sur l'utilisation des observateurs et des filtres complémentaires grâce aux avantages qu'ils procurent par rapport aux filtres de Kalman. Nous avons clôturé ce chapitre en montrant l'utilité du calcul de l'attitude de l'animal dans l'évaluation de son index énergétique et la reconstitution de sa position (*dead reckoning*).

A ce stade, nous avons présenté les principaux éléments nécessaires pour appréhender au mieux la problématique centrale de l'estimation d'attitude et son application au *Bio-logging*. Ainsi, la suite des chapitres sera consacrée à la présentation de notre contribution dans ce domaine.

Chapitre 3

Fusion des capteurs pour la restitution de l'attitude : théories et résultats de simulations

3.1. Introduction et organisation du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de proposer des techniques alternatives de filtrage et d'estimation pour reconstruire l'orientation de l'animal. Les approches actuelles sont valables uniquement pour des cas de mouvements statiques ou quasi-statiques. Par conséquent, nous nous intéresserons principalement à améliorer l'estimation de l'attitude pendant les phases dynamiques du mouvement de l'animal, là où les approches antérieures présentent théoriquement des erreurs d'estimation importantes comme nous l'avons montré dans le chapitre 2.

Après avoir posé la problématique, le reste du chapitre est consacré à présenter notre contribution à l'estimation de l'attitude dans le cadre d'une application écologique et énergétique au sein du *Bio-logging*. Nous développons à ce propos trois approches différents permettant de reconstruire l'attitude et décrivant ainsi la rotation 3D d'un animal par la représentation des quaternions. Les deux premières approches sont issues de la théorie de l'observation d'état. Nous proposons deux formes d'observateurs non linéaires dont l'idée commune est de calculer dans une étape préliminaire algébriquement un quaternion de mesure à l'aide d'une combinaison de vecteurs d'observation issus d'un accéléromètre et d'un magnétomètre triaxiaux. Lors d'une seconde étape, ce quaternion étant souvent très bruité, nous proposons de rajouter la troisième modalité de mesure : les gyromètres. La troisième approche utilise plutôt un filtre complémentaire qui combine les trois modalités de mesures de façon complémentaire sans passer par l'étape préliminaire de calcul algébrique de l'attitude.

Nous proposons finalement quelques tests de simulations préliminaires sous Matlab pour clôturer ce chapitre. La validation expérimentale de ces approches, en utilisant des mesures réelles et en présence de bruit et de biais sur les capteurs, sera abordée dans le chapitre 4.

3.2. Position du problème

Dans le chapitre 2, nous avons étudié la problématique d'estimation de l'attitude et de la posture, précisément dans le cas de l'animal, à travers quelques travaux de la littérature. Les méthodes proposées font intervenir des mesures fournies par trois accéléromètres et trois magnétomètres montés en triaxe orthogonal. Cependant, en pratique, l'estimation de l'attitude en utilisant ces deux capteurs seuls est restreinte à des mouvements statiques ou quasi-statiques (Mahony *et al.*, 2008), là où l'accéléromètre mesure uniquement la projection de la gravité. Lors d'une phase dynamique du mouvement, l'accéléromètre mesure aussi les vibrations et les accélérations propres du corps (Mahony *et al.*, 2008). Par conséquent, l'estimation de l'attitude est erronée durant ces phases importantes du comportement de l'animal (phases d'interaction avec d'autres individus, phases de chasse de proies, phases de fuite, etc.). Néanmoins, l'avantage de faire une estimation sans l'aide de la modalité gyromètre est que même si l'attitude estimée est très bruitée, elle ne diverge pas au cours de temps. D'autres travaux de la littérature ont précisé ainsi que le gyromètre n'est considéré comme un capteur d'attitude capable de fournir des mesures fiables d'attitude durant le mouvement à hautes fréquences d'un corps rigide, qu'à court terme, étant donné le type de biais intrinsèque des gyromètres (Titterton et Weston, 2004 ; Guerrero-Castellanos, 2008).

Partant de cette analyse rapide des avantages et inconvénients de ces différents capteurs, il nous a paru donc judicieux de fusionner les mesures issues d'accéléromètre, magnétomètre et gyromètre afin de trouver un bon compromis entre la précision à court terme donnée par l'intégration des gyromètres et la fiabilité à long terme maintenue par l'attitude estimée à partir des accéléromètres et magnétomètres. Le modèle d'état et les estimateurs considérés par la suite seront établis à partir des mesures issues de ces trois capteurs.

Afin de synthétiser des estimateurs de l'attitude, nous considérons un modèle de processus représenté par une équation différentielle décrivant la variation de l'orientation 3D au cours du temps et autour duquel les estimateurs seront par la suite établis. Rappelons que dans le chapitre 1, notre choix s'est porté sur le quaternion comme forme de représentation de l'attitude. Pour cela nous proposons d'utiliser l'équation cinématique de mouvement d'un corps rigide donnée par (1.27) :

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_{vect}^T \\ I_{3 \times 3} q_0 + [q_{vect}^\times] \end{bmatrix} \omega \quad (3.1)$$

Cette équation différentielle traduit la variation temporelle du quaternion de rotation q du corps rigide en fonction de sa vitesse angulaire $\omega \in \mathbb{R}^3$ mesurée par le gyromètre. Nous supposons que ce capteur est monté en triaxe orthogonal et que ses axes sensibles coïncident avec ceux d'inertie du corps. Nous remarquons qu'une estimation de l'attitude pourrait être achevée en intégrant numériquement l'équation cinématique (3.1) associée aux vitesses angulaires mesurées. Malheureusement et comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, les mesures du gyromètre sont entachées de biais intrinsèque. Elles sont données par (1.41) :

$$\omega_G = \omega + b + \delta_G \quad (3.2)$$

où $\delta_G \in \mathbb{R}^3$ est un bruit blanc gaussien lié à la résolution du capteur. Le biais b est une source d'erreur qui peut affecter la mesure du gyromètre. Il peut être soit constant (Martin et Salaün, 2010), soit légèrement variable au cours du temps (Guerrero-Castellanos, 2008).

Ainsi, sa dynamique d'évolution peut être représentée par (1.42) ou (1.43) :

$$\dot{b} = 0 \quad (3.3)$$

$$\dot{b} = \left(-\frac{1}{\tau} I_{3 \times 3} \right) b + \delta_b \quad (3.4)$$

où $\delta_b \in \mathbb{R}^3$ est supposé être un bruit blanc gaussien et τ est une constante de temps relative à la variation de ce biais.

L'intégration temporelle de (3.1) induit donc des dérives sur l'estimation de l'attitude du corps rigide dues à la présence de ce terme de biais.

3.3. Estimateurs d'attitude proposés

Cette section présente notre contribution à l'estimation de l'attitude de l'animal que nous assimilons à un corps rigide. Ainsi, les approches proposées sont génériques et pourraient être utilisées dans d'autres applications. Nous proposons trois estimateurs d'attitude. Au cours de la première approche, le biais sera modélisé, estimé et retranché des mesures du gyromètre pour déduire par la suite l'attitude estimée en fusionnant les trois mesures considérées. Dans les deux autres approches, nous nous limitons simplement à estimer directement l'attitude sans passer par une étape intermédiaire d'estimation du biais gyrométrique. Ce dernier est plutôt considéré comme un bruit et il est recalé à partir des informations issues des accéléromètres et magnétomètres, une hypothèse que nous la validerons au cours du chapitre 4. Nous utilisons parallèlement les deux techniques de mise à jour à savoir celle par addition de quaternion ou celle par multiplication de quaternion.

3.3.1. Approche 1 : Estimation par observateur non linéaire à l'aide d'une technique d'addition de quaternion

3.3.1.1. Modèle d'état considéré

Souvent, lors du développement d'un estimateur d'état, il est impératif de proposer un modèle d'état décrivant la dynamique du système considéré. Ce modèle contiendra les états à estimer et constituera la structure de base de l'estimateur. Dans notre cas, nous considérons la dynamique de l'attitude d'un corps dans lequel trois gyromètres, ayant des mesures biaisées, sont montés en triaxe orthogonal. Nous avons choisi de représenter le biais par une dynamique constante donnée par l'équation (3.3), que nous intégrons dans la structure du modèle d'état. L'objectif principal de cette première approche est donc d'estimer le quaternion tout en choisissant d'estimer en parallèle le biais puis de le retrancher des mesures du gyromètre.

Nous supposons aussi que dans le corps rigide, trois accéléromètres et trois magnétomètres sont montés en triaxe orthogonal. Un quaternion q_m peut être calculé en utilisant une méthode de fusion de données que nous présenterons par la suite. A partir de l'équation cinématique (3.1) et celle de biais (3.3), la dynamique d'un corps rigide dans lequel trois accéléromètres, trois magnétomètres et trois gyromètres sont montés en triaxe orthogonal est modélisée par le système non linéaire (S_1) :

$$(S_1) : \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_{vect}^T \\ I_{3 \times 3} q_0 + [q_{vect}^x] \end{bmatrix} \omega \\ [0 \ 0 \ 0]^T \end{bmatrix} \\ y = q_m \end{cases} \quad (3.5)$$

A partir de (3.2), le système (S_1) est développé comme suit :

$$(S_1) : \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} [\omega_G - b - \delta_G] \\ [0 \ 0 \ 0]^T \end{bmatrix} \\ y = q_m = [q_{m0} \ q_{m1} \ q_{m2} \ q_{m3}]^T \end{cases} \quad (3.6)$$

où $q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T \in \mathbb{R}^4$ et $b = [b_x \ b_y \ b_z]^T \in \mathbb{R}^3$ représentent, respectivement, le quaternion de rotation et le biais intrinsèque du gyromètre. Ces variables constituent les

états du système (S_1) à estimer. $q_m \in \mathbb{R}^4$ est le quaternion calculé à partir d'une méthode de fusion optimale de données issues des accéléromètres et magnétomètres. Ce quaternion est souvent entaché de bruit, surtout pendant les hautes fréquences du mouvement. L'origine de ces erreurs provient de l'effet des accélérations propres a mesurées par l'accéléromètre. Rappelons qu'un accéléromètre est un bon capteur d'attitude uniquement pour les phases statiques ou quasi-statiques du mouvement lorsque la condition suivante est satisfaite ($\|a\|_2 \ll \|G\|_2$).

3.3.1.2. Observateur non linéaire additif de l'attitude

Cette première approche est inspirée de la méthode développée par (Salcudean, 1991). Nous proposons un observateur non linéaire de l'attitude (Guerrero-Castellanos, 2008) qui exploite les équations différentielles du système (S_1) mentionné dans (3.6) et auxquelles nous ajoutons, *par une simple addition de quaternion*, un terme permettant la mise à jour des estimés d'attitude et de biais. Ainsi, l'observateur non linéaire additif (O_1) s'écrit sous la forme suivante (Fourati *et al.*, 2010b ; Fourati *et al.*, 2011b) :

$$(O_1) : \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{q}} \\ \dot{\hat{b}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\hat{q}_1 & -\hat{q}_2 & -\hat{q}_3 \\ \hat{q}_0 & -\hat{q}_3 & \hat{q}_2 \\ \hat{q}_3 & \hat{q}_0 & -\hat{q}_1 \\ -\hat{q}_2 & \hat{q}_1 & \hat{q}_0 \end{bmatrix} [\omega_G - \hat{b}] + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\hat{q}_1 & -\hat{q}_2 & -\hat{q}_3 \\ \hat{q}_0 & -\hat{q}_3 & \hat{q}_2 \\ \hat{q}_3 & \hat{q}_0 & -\hat{q}_1 \\ -\hat{q}_2 & \hat{q}_1 & \hat{q}_0 \end{bmatrix} k_q q_{er,vect} \\ -k_b q_{er,vect} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.7)$$

où \hat{q} et \hat{b} constituent, respectivement, le quaternion et le biais estimés. k_q et $k_b \in \mathbb{R}$ représentent les gains de l'observateur et permettent de fixer sa vitesse de convergence. $q_{er,vect} = [q_{er1} \ q_{er2} \ q_{er3}]^T$ dénote la partie vectorielle du quaternion d'erreur q_{er} . Ce dernier est obtenu à l'issue d'un produit de quaternion entre \hat{q} , obtenu par intégration de l'équation (3.7), et q_m . Ce produit est ainsi défini par :

$$q_{er} = \hat{q}^{-1} \otimes q_m = \begin{bmatrix} q_{er0} & q_{er,vect}^T \end{bmatrix}^T \quad (3.8)$$

où \hat{q}^{-1} est le quaternion inverse de \hat{q} représenté par (1.23).

Notons que la structure de cet observateur diffère de la forme usuelle souvent utilisée dans le cas des systèmes non linéaires (Besançon, 2007). Cette différence apparaît dans le terme de correction q_{er} qui est calculé plutôt en utilisant un produit de quaternion entre la sortie mesurée et celle estimée au lieu d'une simple différence (Koprubasi et Thein, 2006).

Le schéma bloc de l'estimation de l'attitude par l'observateur non linéaire additif est montré dans la figure 3.1.

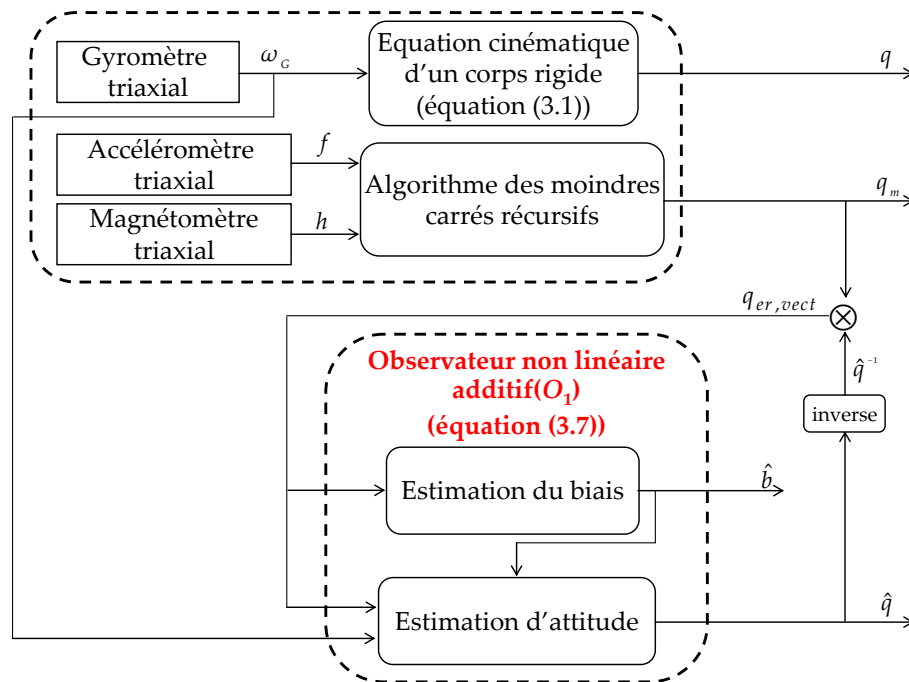


Fig. 3.1. Schéma bloc de l'observateur non linéaire additif de l'attitude

3.3.1.3. Détermination du quaternion de mesure q_m

Le quaternion de mesure q_m , utilisé comme sortie du système (S_1) établi dans (3.6), intervient dans la structure de l'observateur et plus précisément dans le calcul du terme d'erreur (3.8). q_m est obtenu à partir d'une méthode de fusion de deux (ou plusieurs) vecteurs non colinéaires (Fourati *et al.*, 2009a). Dans notre cas, ces vecteurs sont représentés par la gravité et le champ magnétique, appelés *vecteurs d'observation*.

Comme nous l'avons signalé dans le chapitre 2, le problème de la détermination optimale de l'attitude en utilisant des vecteurs d'observation est connu sous le nom de *problème de Wahba* (Wahba, 1965). Une solution à ce problème, appliquée au *Bio-logging*, a été proposée par (Elkaim *et al.*, 2006) pour estimer l'orientation 3D des éléphants de mer. La méthode proposée dans ce papier utilise les vecteurs d'observation relatifs à la gravité $G = [0 \ 0 \ g]^T$ et au champ magnétique $m = [m_x \ 0 \ m_z]^T$ et les vecteurs f et h fournis, respectivement, par trois accéléromètres et trois magnétomètres (Fourati *et al.*, 2008b ; Fourati *et al.*, 2009b). Il s'agit dans (Elkaim *et al.*, 2006) de mouvements quasi-statiques de l'animal, ce qui signifie que le vecteur d'accélération propre a est négligeable par rapport à celui de la gravité G . L'attitude q_m , utilisée comme mesure à l'observateur (3.7), est donc déduite à partir de ces deux modalités de mesures par le biais d'une technique des moindres carrés itératifs (Fourati *et al.*, 2009f).

Algorithme des moindres carrés itératifs :

- 1) Saisir les mesures f et h .
- 2) Initialiser le quaternion de mesure $q_m = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.
- 3) Calculer $\hat{G} = \hat{q} \otimes f \otimes \hat{q}^{-1}$ et $\hat{m} = \hat{q} \otimes h \otimes \hat{q}^{-1}$. $\hat{G} = [0 \ \hat{G}_{vect}]^T \in \mathbb{R}^4$ et $\hat{m} = [0 \ \hat{m}_{vect}]^T \in \mathbb{R}^4$ représentent les quaternions purs associés, respectivement, aux vecteurs de gravité et de champ magnétique, exprimés dans le système de coordonnées fixes (N). \hat{q}^{-1} est le quaternion inverse de \hat{q} , exprimé dans (1.23).
- 4) Calculer les erreurs de navigation $\partial \hat{G} = G - \hat{G}_{vect}$ et $\partial \hat{m} = m - \hat{m}_{vect}$ et former par la suite $z = [\partial \hat{m} \ \partial \hat{G}]^T$.
- 5) Calculer la matrice d'observation : $O = -2 \begin{bmatrix} [[m]^\times]^T & [[G]^\times]^T \end{bmatrix}^T$.
- 6) Calculer la pseudo-inverse $O^* = [O^T \ O]^{-1} O^T$.
- 7) Mettre à jour le quaternion d'erreur : $q_e = \alpha O^* z$ où α est une constante qui fixe la vitesse de convergence de l'algorithme. Elle est choisie souvent entre 0 et 1 (Elkaim *et al.*, 2006).
- 8) Mettre à jour le quaternion de mesure : $q_m(k+1) = q_m(k) \otimes [1 \ q_e]^T$.
- 9) Revenir à l'étape 3 et répéter jusqu'à la convergence vers une valeur stable de q_m .

3.3.1.4. Analyse de la stabilité

En exploitant les preuves proposées dans (Thienel et Sanner, 2003 ; Mahony *et al.*, 2008), une analyse mathématique détaillée de la convergence de l'observateur et sa stabilité globale asymptotique a été présentée dans (Fourati *et al.*, 2010b ; Fourati *et al.*, 2011b).

Soient le quaternion d'erreur q_{er} et l'erreur du biais \tilde{b} définis comme suit :

$$q_{er} = [q_{er0} \ q_{er1} \ q_{er2} \ q_{er3}]^T = \hat{q}^{-1} \otimes q_m \quad (3.9)$$

$$\tilde{b} = [\tilde{b}_x \ \tilde{b}_y \ \tilde{b}_z]^T = b - \hat{b} \quad (3.10)$$

Supposons que $q_m \approx q$ et $\delta_G = 0$. En utilisant le produit de quaternion \otimes défini dans (1.18), l'équation (3.9) peut être écrite comme suit :

$$q_{er} = \begin{bmatrix} q_0 \hat{q}_0 + q_1 \hat{q}_1 + q_2 \hat{q}_2 + q_3 \hat{q}_3 \\ -q_0 \hat{q}_1 + q_1 \hat{q}_0 + q_2 \hat{q}_3 - q_3 \hat{q}_2 \\ -q_0 \hat{q}_2 - q_1 \hat{q}_3 + q_2 \hat{q}_0 + q_3 \hat{q}_1 \\ -q_0 \hat{q}_3 + q_1 \hat{q}_2 - q_2 \hat{q}_1 + q_3 \hat{q}_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

En dérivant (3.11) et (3.10), nous obtenons :

$$\begin{cases} \dot{q}_{er} = \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \hat{q}_0 + q_0 \dot{\hat{q}}_0 + \dot{q}_1 \hat{q}_1 + q_1 \dot{\hat{q}}_1 + \dot{q}_2 \hat{q}_2 + q_2 \dot{\hat{q}}_2 + \dot{q}_3 \hat{q}_3 + q_3 \dot{\hat{q}}_3 \\ -\dot{q}_0 \hat{q}_1 - q_0 \dot{\hat{q}}_1 + \dot{q}_1 \hat{q}_0 + q_1 \dot{\hat{q}}_0 + \dot{q}_2 \hat{q}_3 + q_2 \dot{\hat{q}}_3 - \dot{q}_3 \hat{q}_2 - q_3 \dot{\hat{q}}_2 \\ -\dot{q}_0 \hat{q}_2 - q_0 \dot{\hat{q}}_2 - \dot{q}_1 \hat{q}_3 - q_1 \dot{\hat{q}}_3 + \dot{q}_2 \hat{q}_0 + q_2 \dot{\hat{q}}_0 + \dot{q}_3 \hat{q}_1 + q_3 \dot{\hat{q}}_1 \\ -\dot{q}_0 \hat{q}_3 - q_0 \dot{\hat{q}}_3 + \dot{q}_1 \hat{q}_2 + q_1 \dot{\hat{q}}_2 - \dot{q}_2 \hat{q}_1 - q_2 \dot{\hat{q}}_1 + \dot{q}_3 \hat{q}_0 + q_3 \dot{\hat{q}}_0 \end{bmatrix} \\ \dot{\tilde{b}} = \dot{b} - \dot{\hat{b}} \end{cases} \quad (3.12)$$

A partir de (3.6) et (3.7), nous remplaçons $\dot{q} = [\dot{q}_0 \quad \dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_3]^T$, $\dot{b} = [\dot{b}_x \quad \dot{b}_y \quad \dot{b}_z]^T$, $\dot{\hat{q}} = [\dot{\hat{q}}_0 \quad \dot{\hat{q}}_1 \quad \dot{\hat{q}}_2 \quad \dot{\hat{q}}_3]^T$ et $\dot{\hat{b}} = [\dot{\hat{b}}_x \quad \dot{\hat{b}}_y \quad \dot{\hat{b}}_z]^T$ dans le système d'équations d'erreurs (3.12).

Finalement, la dynamique de l'erreur d'observation peut s'écrire de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{q}_{er} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & [\tilde{b} + k_q q_{er, vect}]^T \\ -[\tilde{b} + k_q q_{er, vect}] & [2\omega^\times] + [\tilde{b} + k_q q_{er, vect}]^\times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{er0} \\ q_{er, vect} \end{bmatrix} \\ \dot{\tilde{b}} = k_b q_{er, vect} \end{cases} \quad (3.13)$$

Ainsi, il est facile de vérifier que :

$$\begin{bmatrix} q_{er}^T & \tilde{b}^T \end{bmatrix} = [\pm 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (3.14)$$

sont les états d'équilibre des dynamiques d'erreurs (3.13).

Théorème 3.1.

Considérons le système (S_1) , donné par (3.6), ayant $(q(t), b(t))$ comme solution, ω_G comme mesure issue du gyromètre et q_m comme sortie représentant le quaternion mesuré par les modalités accéléromètre et magnétomètre. $(\hat{q}(t), \hat{b}(t))$ dénote la solution de (3.7). Définissons les variables d'erreurs $q_{er}(t) = \hat{q}^{-1} \otimes q_m$ et $\tilde{b}(t) = b - \hat{b}$. Considérons les points d'équilibre du système (3.13), $\begin{bmatrix} q_{er}^T(t) & \tilde{b}^T(t) \end{bmatrix} = [\pm 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$. Le

point d'équilibre $\begin{bmatrix} q_{er}^T(t) & \tilde{b}^T(t) \end{bmatrix} = [+1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ (respectivement $\begin{bmatrix} q_{er}^T(t) & \tilde{b}^T(t) \end{bmatrix} = [-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$) est quasi-globalement asymptotiquement stable si $q_{er0} \geq 0$ (respectivement $q_{er0} \leq 0$) et pour toutes les conditions initiales $(q_{er}(t_0), \tilde{b}(t_0))$, la trajectoire estimée $(\hat{q}(t), \hat{b}(t))$ converge vers celle de référence $(q(t), b(t))$.

Preuve

Considérons les deux fonctions candidates de Lyapunov V_1 et V_2 . Ces deux fonctions sont continues, définies positives, bornées et de classe C^1 :

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{b}^T \tilde{b} + k_b \left((1 - q_{er0})^2 + q_{er, vect}^T q_{er, vect} \right), \quad \text{si } q_{er0} \geq 0 \quad (3.15)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \tilde{b}^T \tilde{b} + k_b \left((1 + q_{er0})^2 + q_{er, vect}^T q_{er, vect} \right), \quad \text{si } q_{er0} < 0 \quad (3.16)$$

Dans notre cas, le mouvement de l'animal, assimilé à un corps rigide, est libre et sans aucune restriction. Alors q_{er0} peut prendre des valeurs positives ou négatives selon la valeur de l'angle de rotation φ du quaternion. Choisissons par exemple le cas où $q_{er0} \geq 0$ et considérons la fonction de Lyapunov représentée par (3.15) mais écrite sous une forme plus simplifiée :

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{b}^T \tilde{b} + k_b (2(1 - q_{e0})) \quad (3.17)$$

En dérivant (3.17) et en utilisant (3.13), nous obtenons :

$$\dot{V}_1 = -2k_b \dot{q}_{e0} + \tilde{b}^T \dot{\tilde{b}} \quad (3.18)$$

Finalement

$$\dot{V}_1 = -k_b k_q q_{er, vect}^T q_{er, vect} \quad (3.19)$$

Puisque $0 \leq q_{er0} \leq 1$, alors :

$$q_{er, vect}^T q_{er, vect} = 1 - q_{er0}^2 \geq 0 \quad (3.20)$$

Lorsque les gains k_q et k_b sont des constantes positives, nous pouvons écrire :

$$\dot{V}_1 \leq 0 \quad (3.21)$$

Il est clair que \dot{V}_1 est semi définie négative et que pour les états d'équilibre (3.14), la condition $V_1(q_{er}, \tilde{b}) = \dot{V}_1(q_{er}, \tilde{b}) = 0$ est satisfaite. Donc, $(q_{er, vect}, \tilde{b}) \rightarrow 0$ et par conséquent $q_{er0} \rightarrow +1$ (la norme de q_{er} est toujours égale à 1 (Kuipers, 1999)).

De la même façon, dans le cas où $q_{er0} < 0$, la fonction de Lyapunov V_2 associée (3.16) mène au même résultat obtenu dans (3.19).

Maintenant, considérons le domaine D suivant :

$$D = \left\{ q_{er} \in \mathbb{R}^{4 \times 1} / -1 \leq q_{er}(i) \leq 1 \text{ et } \tilde{b} \in \mathbb{R}^{3 \times 1} / -\infty < \tilde{b}(i) < +\infty \right\} \quad (3.22)$$

Soit $S' = \left\{ (q_{er}, \tilde{b}) \in D / \dot{V}_i(q_{er}, \tilde{b}) = 0, i \in \{1, 2\} \right\}$. Par conséquent, les seules solutions qui appartiennent à S' sont celles données dans (3.14). En appliquant le principe de Krasovskii-LaSalle énoncé dans (Khalil, 2002), il est possible de conclure que les états d'équilibre $\begin{bmatrix} q_{er}^T & \tilde{b}^T \end{bmatrix} = [\pm 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ sont quasi-globalement asymptotiquement stables.

■

3.3.1.5. Résultats de simulation obtenus avec l'approche 1

Après avoir défini le premier estimateur d'attitude en utilisant l'algèbre des quaternions, nous proposons dans cette partie d'évaluer ses performances d'estimation en ayant recours à des simulations numériques préliminaires décrivant la variation d'attitude durant le mouvement d'un animal. Plus précisément, nous avons considéré que cet animal est représenté théoriquement par un manchot (par exemple) que nous assimilons par la suite à un corps rigide. Une triade de capteurs formée par un accéléromètre, un magnétomètre et un gyromètre est rigidement attachée à ce dernier (voir figure 3.2). On suppose aussi que les axes principaux de cette triade sont nominalement alignés avec ceux de ce corps et sont représentés par le système de coordonnées mobiles (B).

Plusieurs simulations ont été réalisées sous l'environnement Matlab. Nous avons ainsi choisi de représenter uniquement un exemple parmi eux. La première étape consiste à générer un modèle théorique de l'attitude d'un corps rigide qui tourne avec une vitesse angulaire donnée ω . Cette attitude définit l'orientation du système de coordonnées mobiles (B) par rapport au système de coordonnées fixes NED (N). Ce modèle est obtenu à partir d'une intégration temporelle de l'équation cinématique (3.1) puis utilisé comme référence pour évaluer les performances d'estimation de l'attitude issues de

l'observateur non linéaire additif (3.7). Notons que les différentes mesures fournies par la triade de capteurs ont été échantillonnées à une fréquence de 100 Hz.

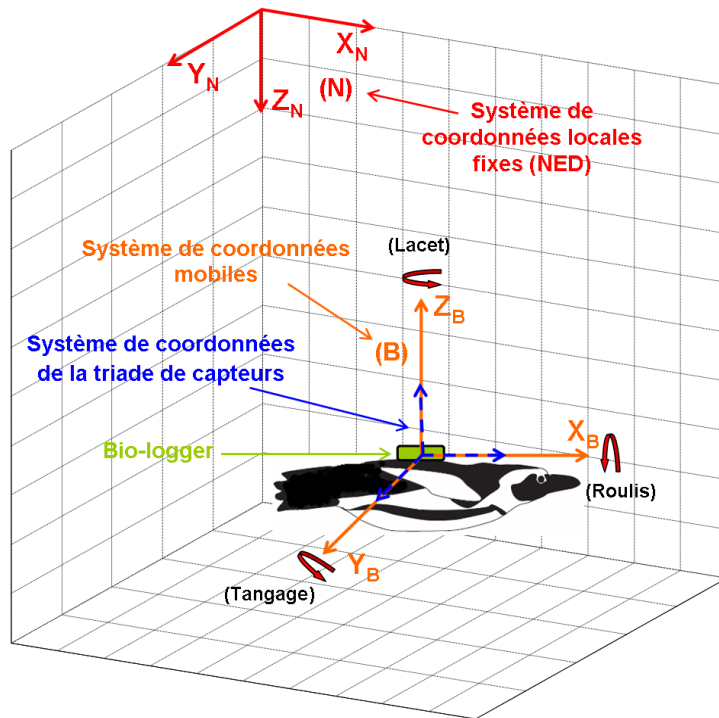


Fig. 3.2. Représentation théorique de l'application finale : un manchot qui porte le bio-logger représenté par une triade composée d'accéléromètre, de magnétomètre et de gyromètre

Le modèle théorique de simulation choisi est celui d'un animal qui tourne avec une vitesse angulaire donnée dans le tableau 3.1.

Vitesse angulaire	$0 < t \leq 25 \text{ sec}$	$25 \text{ sec} < t \leq 50 \text{ sec}$
$\omega_x(t)$	$-1.8 \sin(2t)$	$-0.9 \sin(1.2t)$
$\omega_y(t)$	$2.2 \cos(-1.5t)$	$1.4 \cos(-0.5t)$
$\omega_z(t)$	$1.3 \sin(0.5t)$	$0.9 \sin(2.2t)$

Tab. 3.1. Exemple de vitesse angulaire simulée

Afin de représenter les imperfections de chaque capteur, un bruit blanc gaussien a été ajouté aux mesures accélérométriques, magnétométriques et gyrométriques (voir tableau 3.2). Un biais constant additif a été également considéré pour les mesures du gyromètre tel que $b = [-0.05 \quad 0.1 \quad 0.08]^T$ (rad / s).

Les gains de l'observateur non linéaire additif ont été choisis en fonction des niveaux de bruits et de la fréquence d'échantillonnage considérée tels que $k_q = 20$ et $k_b = 30$. Ce réglage de gain tient compte aussi de la vitesse de convergence de l'observateur. La

constante de temps τ de l'algorithme de moindres carrés itératifs a été choisie à une valeur $\tau = \frac{1}{3}$.

Capteurs	Paramètres	Ecart types	Unités
Accéléromètre	δ_f	0.1	m/s^2
Magnétomètre	δ_h	0.05	Gauss
Gyromètre	δ_G	0.2	rad/sec

Tab. 3.2. Caractéristiques des bruits considérés pour les mesures de chaque capteur

Les conditions initiales à l'instant $t_0 = 0$ pour le quaternion et le biais théoriques ainsi que pour le quaternion et le biais estimés sont données dans le tableau 3.3. L'objectif est d'illustrer la capacité de l'observateur à estimer l'attitude et le biais.

Conditions initiales	Quaternion	Biais
Modèle de référence	$q(t_0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$	$b(t_0) = [-0.05 \ 0.1 \ 0.08]^T$
Observateur non linéaire additif	$\hat{q}(t_0) = [0.4 \ 0.6 \ 0.3 \ 0.9]^T$	$\hat{b}(t_0) = [0 \ 0 \ 0]^T$

Tab. 3.3. Conditions initiales du quaternion et du biais pour le modèle de référence et l'observateur non linéaire additif

Les courbes d'évolutions temporelles du quaternion théorique q , du quaternion estimé \hat{q} , du biais théorique b et du biais estimé \hat{b} sont montrées dans les figures 3.3 et 3.4. Bien que le modèle théorique et l'observateur non linéaire additif aient été initialisés avec des conditions initiales différentes, la convergence des états estimés vers ceux réels est assurée dans un temps court, acceptable dans le cas de notre application au *Bio-logging*. Notons que les états ont été initialisés loin de leurs vraies valeurs et que la convergence de l'observateur n'est pas altérée. Ces simulations ont montré également que la structure de l'observateur non linéaire additif s'accommode très bien avec le niveau d'erreur choisi dans les trois capteurs utilisés.

Afin de juger de la performance globale d'estimation, nous avons tracé dans la figure 3.5 les erreurs d'estimation de l'attitude et celles du biais. Ces erreurs sont calculées à partir d'une simple différence entre les états théoriques et ceux estimés. Deux échelles de représentation ont été utilisées pour les périodes entre 0 et 6 sec et celles au delà de cet intervalle (un zoom entre 6 et 50 sec). La deuxième période illustre donc la convergence de ces erreurs vers zéro ce qui montre la capacité de cet estimateur à reconstruire l'attitude du modèle de référence.

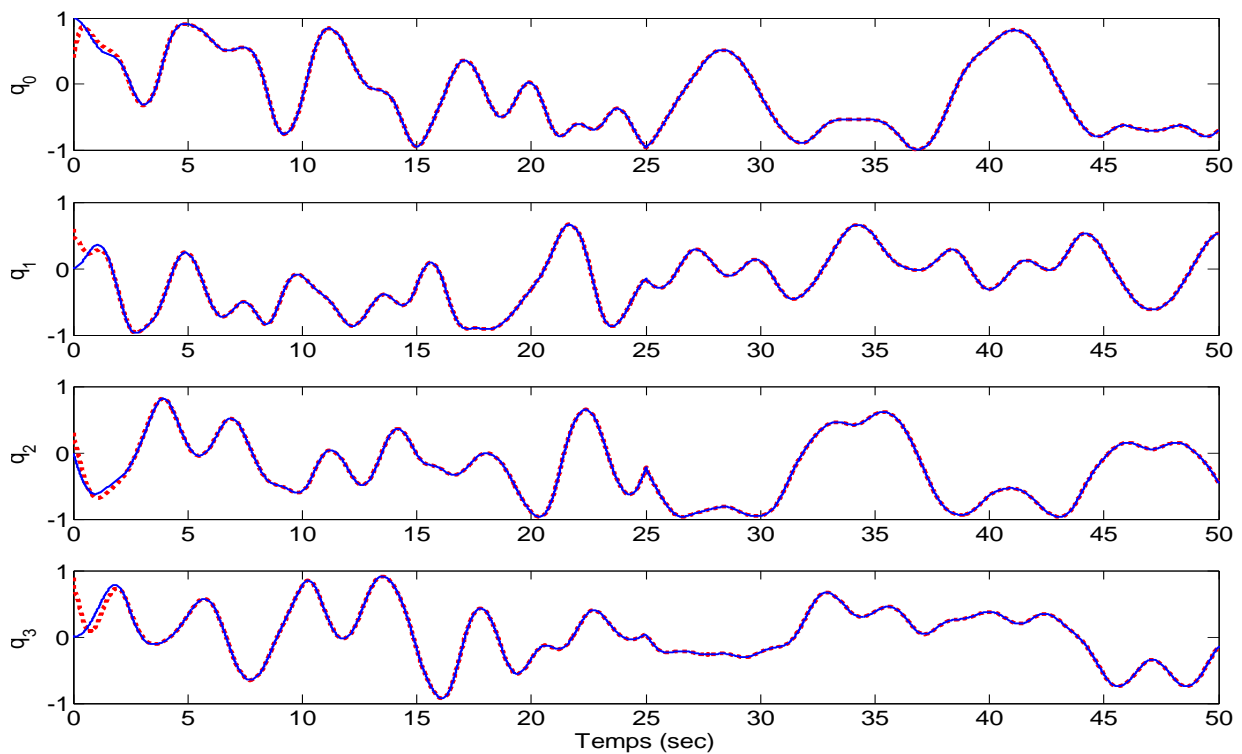


Fig. 3.3. Estimation des composantes du quaternion d'attitude par l'observateur non linéaire additif : q (modèle de référence (—)), \hat{q} (les états estimés (- -))

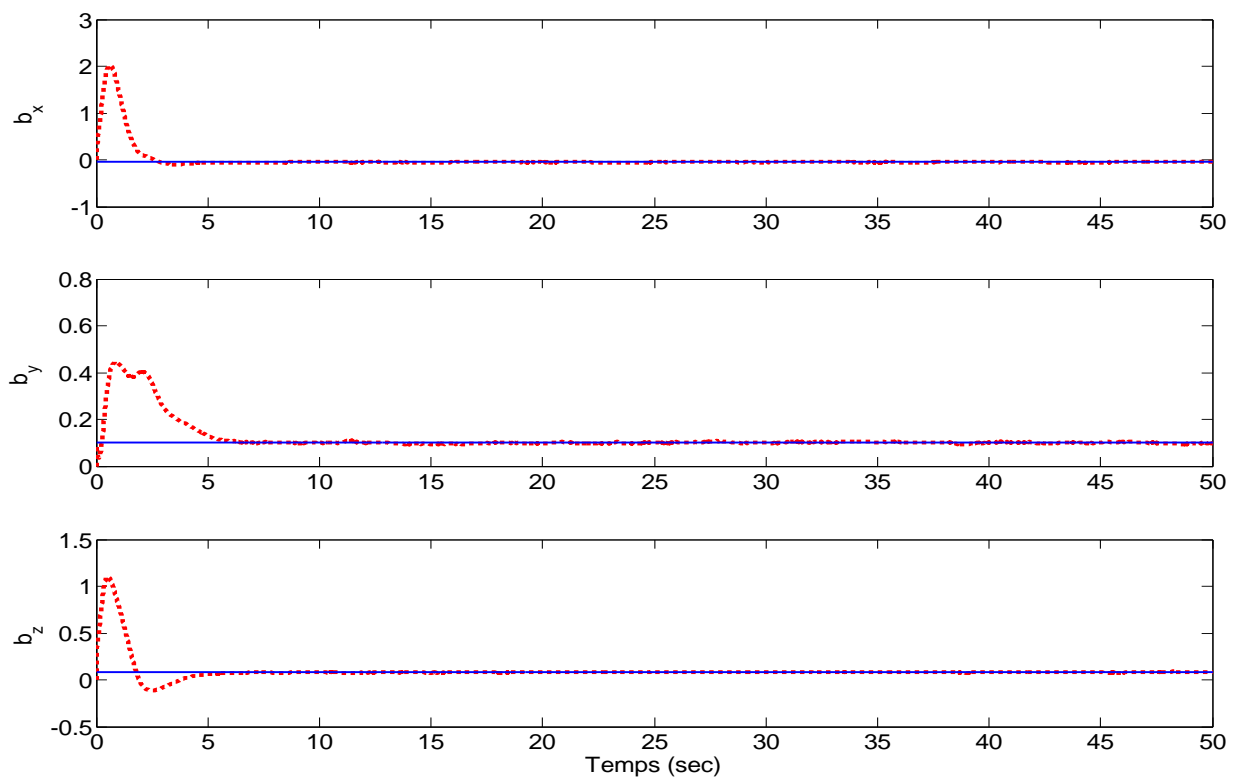


Fig. 3.4. Estimation des composantes du biais dans le gyromètre par l'observateur non linéaire additif : b (modèle de référence (—)), \hat{b} (les états estimés (- -))

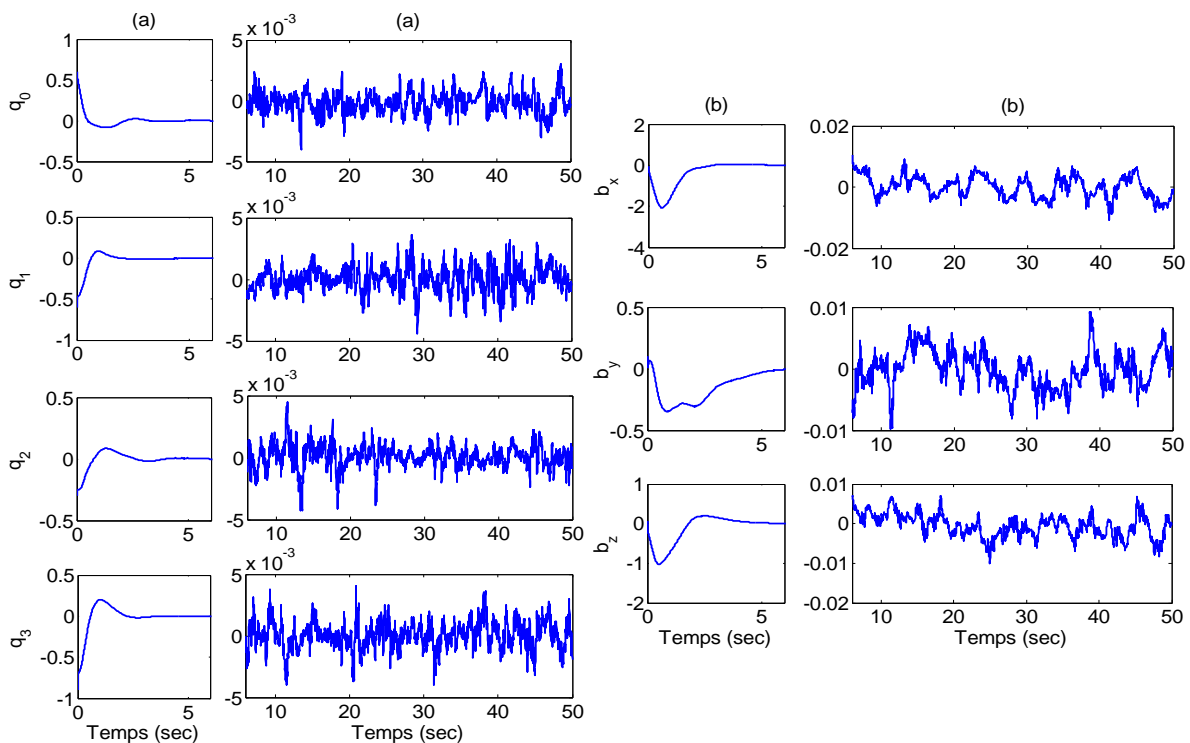


Fig. 3.5. (a) Erreurs d'estimation sur les composantes du quaternion obtenues avec l'observateur non linéaire additif (avec un zoom entre 6 et 50 sec) - (b) Erreurs d'estimation sur les composantes du biais obtenues avec l'observateur non linéaire additif (avec un zoom entre 6 et 50 sec)

3.3.2. Approche 2 : Estimation par observateur non linéaire à l'aide d'une technique de multiplication de quaternion

La première approche développée précédemment est basée sur un observateur non linéaire additif dans lequel une phase de mise à jour par addition de quaternion a été intégrée. Cette technique est facile à implémenter mais elle est considérée parfois comme une approximation locale, engendrant parfois des erreurs pour des grands changements de l'attitude (Köprübasi et Thein, 2006). Une propriété essentielle de l'algèbre des quaternions est que le passage d'un quaternion à un autre est souvent réalisé à l'aide d'une multiplication spécifique. Pour cela, nous proposons dans cette section une méthode alternative qui utilise la technique de mise à jour par multiplication de quaternion. A notre connaissance, cette technique a été rarement utilisée dans la conception d'estimateur d'attitude et mérite d'avoir une attention plus particulière. L'approche développée est basée sur un observateur à modes glissants. Ce choix s'explique par les propriétés inhérentes de robustesse relatives à ce type d'observateur (Utkin, 1992 ; Slotine *et al.*, 1987). En effet, la dynamique d'erreurs des états du système est forcée pour atteindre une surface prédéfinie de l'espace d'état et y rester ultérieurement. Contraint à cette surface, le mouvement résultant, appelé mouvement glissant, est souvent peu sensible à toutes les incertitudes ou signaux extérieurs de perturbation (Fossard et Floquet, 2002 ; Chaibet *et al.*, 2008).

L'observateur proposé exploite trois types de mesures complémentaires, à savoir l'accélération, la vitesse angulaire et le champ magnétique. Partant de l'idée que les algorithmes d'estimation de l'attitude que nous cherchons à développer seront exécutables en temps réel dans une étape finale de ce projet, il fallait donc essayer de simplifier au maximum ce genre d'algorithme. Ainsi, nous avons eu l'idée d'éliminer l'étape d'estimation du biais dans le gyromètre et observer par la suite l'effet de cette élimination. Nous pensons que ce type de biais peut être recalé tout simplement en exploitant la complémentarité au niveau fréquentiel observée entre les trois types de mesures considérés.

3.3.2.1. Système d'état considéré

L'équation cinématique (3.1) constitue le point de départ pour développer l'observateur à modes glissants en exploitant l'algèbre des quaternions et ses propriétés intrinsèques. Les mesures de vitesse angulaire sont entachées d'erreurs et de biais additifs (Brown et Hwang, 1997). Par conséquent, en les introduisant dans (3.1), nous obtenons la forme suivante :

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_{vect}^T \\ I_{3 \times 3} q_0 + [q_{vect}^\times] \end{bmatrix} \omega + \gamma(t) \quad (3.23)$$

où $[q_{vect}^\times]$ est défini par (Mahony *et al.*, 2008) :

$$[q_{vect}^\times] = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}^\times = \begin{bmatrix} 0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & 0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

et $\gamma(t)$ est un vecteur de bruit additif provenant principalement des mesures du gyromètre.

Nous considérons ainsi le système (S_2) composé de (3.23) et du modèle de mesure linéaire y :

$$(S_2) : \begin{cases} \dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_{vect}^T \\ I_{3 \times 3} q_0 + [q_{vect}^\times] \end{bmatrix} \omega + \gamma(t) \\ y = Cq + v \end{cases} \quad (3.25)$$

où $q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ est le vecteur quaternion à estimer. Le modèle de mesure linéaire y est choisi tel que $y = q_m \in \mathbb{R}^4$ et $C = I_{4 \times 4}$. v représente un vecteur de bruit et

q_m est le quaternion de mesure calculé à partir de la méthode de fusion proposée dans l'approche précédente (section 3.3.1.3). Ce quaternion sera donc calculé à partir d'un algorithme de moindres carrés itératifs qui combine deux vecteurs d'observation (la gravité G et le champ magnétique terrestre m) et leurs projections dans le système de coordonnées mobiles (B) mesurées à l'aide d'un accéléromètre et d'un magnétomètre triaxiaux.

3.3.2.2. Observateur à modes glissants de l'attitude

L'idée principale de l'observateur proposé est basée sur l'utilisation de la technique de multiplication de quaternion que ce soit dans la phase de correction ou celle de mise à jour (Kuipers, 1999) :

$$q' = \delta q \otimes q \quad (3.26)$$

La technique de multiplication de quaternion est utilisée dans (3.26) afin de mettre à jour le processus de calcul d'un quaternion. δq est un terme de correction, pouvant être exprimé en fonction des erreurs d'estimation du quaternion (Kuipers, 1999 ; Chou, 1992). Pour effectuer la mise à jour de l'estimation du quaternion, l'équation (3.26) peut être transformée sous la forme suivante :

$$\hat{q}^+ = \delta \hat{q}^+ \otimes \hat{q}^- \quad (3.27)$$

où \hat{q}^+ et \hat{q}^- représentent, respectivement, les estimations de quaternion postérieure et antérieure. $\delta \hat{q}^+$ permet ainsi d'effectuer la mise à jour et assure le passage entre les deux quaternions.

L'observateur à modes glissants peut être synthétisé en utilisant (3.25) et (3.27) tout en choisissant de contraindre les dynamiques du système à converger sur *une surface de glissement* représentée par le quaternion d'erreur. L'utilisation de (3.27) dans la structure de l'observateur permet de préserver quelques propriétés intrinsèques des quaternions. Ainsi, l'observateur à modes glissants proposé (O_2) prend la forme suivante (Fourati et al., 2010c ; Fourati et al., 2010d) :

$$(O_2) : \left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{q}}_0 \\ \dot{\hat{q}}_1 \\ \dot{\hat{q}}_2 \\ \dot{\hat{q}}_3 \end{bmatrix} = \delta_{\kappa_1} \otimes \delta_{\kappa_2} \otimes \left(\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\hat{q}_{vect}^T \\ I_{3 \times 3} \hat{q}_0 + [\hat{q}_{vect}^\times] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \gamma(t) \right) \end{array} \right. \quad (3.28)$$

où \hat{q} est le quaternion estimé à l'instant t et $[\hat{q}_{vect}^*]$ est défini dans (3.24). δ_{K_1} représente le terme de correction discontinu (glissant) et δ_{K_2} est le terme de correction linéaire. Notons que δ_{K_2} agit sur la vitesse de convergence de l'observateur (3.28). Dans le but d'effectuer la multiplication de quaternion, il est nécessaire de transformer chaque terme de correction, de dimension 3, sous forme d'un quaternion. Cette transformation est obtenue en utilisant la méthode de normalisation forcée (Deutschmann, 1992). δ_{K_1} et δ_{K_2} sont donc calculés de la façon suivante :

$$\begin{cases} \delta_{K_1} = \frac{1}{\|X_1\|} X_1 \\ \delta_{K_2} = \frac{1}{\|X_2\|} X_2 \end{cases} \quad (3.29)$$

où

$$\begin{cases} X_1 = K_1 \left[1 \quad \text{sat} \left[\frac{q_{e,vect}}{\rho} \right] \right]^T \\ X_2 = K_2 \left[1 \quad q_{e,vect} \right]^T \end{cases} \quad (3.30)$$

avec K_1 et $K_2 \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ sont les gains de l'observateur exprimés sous la forme suivante :

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} ; \quad K_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_6 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Notons que $q_{e,vect}$ est la partie imaginaire du quaternion d'erreur q_e . q_e mesure la différence entre le quaternion inverse estimé \hat{q}^{-1} et le quaternion mesuré q_m (Chou, 1992) :

$$q_e = q_m \otimes \hat{q}^{-1} = [q_{e0} \quad q_{e,vect}]^T \quad (3.32)$$

Rappelons que q_m est obtenu à partir d'une méthode de fusion basée sur une technique de moindres carrés itératifs (voir chapitre 3, section 3.3.1.3).

Les parties scalaires de X_1 et X_2 sont choisies proches de l'unité puisque le quaternion incrémental correspond à des rotations ayant des angles très petits (Elkaim *et al.*, 2006).

La fonction de saturation (*sat*) est utilisée pour éviter les hautes fréquences générées par le phénomène de *chattering* autour de la surface de glissement $q_{e,vect}$ (Koprubasi et Thein, 2006) :

$$sat\left(\frac{q_{e,vect}}{\rho}\right) = \begin{cases} 1 & q_{e,vect} \leq -\rho \\ \frac{q_{e,vect}}{\rho} & |q_{e,vect}| \leq \rho \\ -1 & q_{e,vect} \geq \rho \end{cases} \quad (3.33)$$

Le paramètre ρ fixe l'épaisseur de la surface de glissement $q_{e,vect}$ et détermine ainsi le comportement de glissement autour de $q_{e,vect} = 0$. Le choix de ce paramètre dépend de la magnitude des bruits de mesures, du niveau de *chattering* tolérable sur la surface de glissement et du temps de convergence choisi. En effet, nous cherchons à imposer l'évolution des dynamiques du système (S_2) sur une variété, sur laquelle l'erreur d'estimation de la sortie $q_{e,vect}$ est nulle.

Afin de préserver la norme unitaire du quaternion estimé \hat{q} , ce dernier doit être normalisé. Cette normalisation permet d'améliorer les performances de la convergence et d'éviter les divergences du quaternion estimé (Köprübasi et Thein, 2006). Cette normalisation est effectuée de la façon suivante (Guerrero-Castellanos, 2008) :

$$\hat{q}_{norm} = \frac{\hat{q}}{\|\hat{q}\|} \quad (3.34)$$

La figure 3.6 illustre le schéma bloc de l'observateur à modes glissants permettant d'estimer l'attitude d'un corps rigide en mouvement.

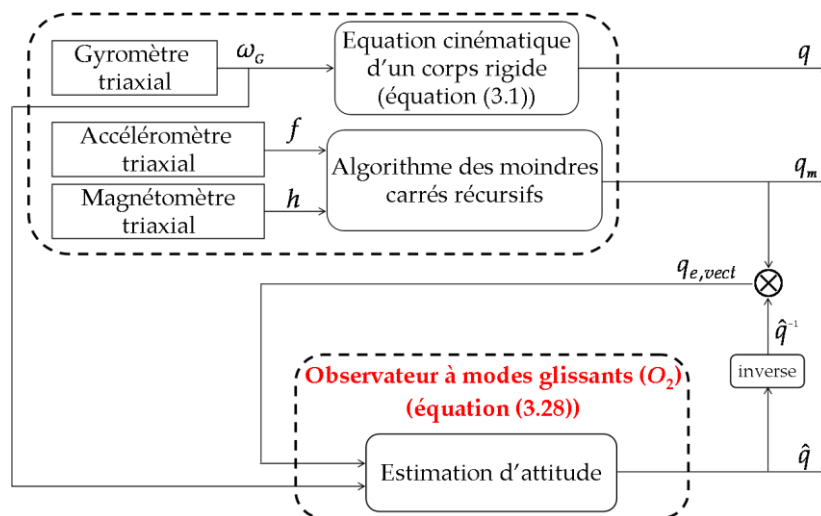


Fig. 3.6. Schéma bloc de l'observateur à modes glissants de l'attitude

La structure de l'observateur considéré permet de profiter, d'une part de la précision du quaternion obtenu à partir de l'intégration des mesures gyrométriques à court terme et d'autre part de la fiabilité du quaternion issu de la fusion des mesures fournies par l'accéléromètre et le magnétomètre à long terme, bien qu'il soit souvent bruité (Brown et Hwang, 1997). En effet, l'observateur fusionne en même temps les régions de basses fréquences, là où les estimations de l'attitude sont plus précises et les régions de hautes fréquences, là où l'intégration des mesures gyrométriques est plus crédible. Ainsi, la structure résultante est complémentaire : les mesures à hautes fréquences issues du gyromètre sont combinées avec celles à basses fréquences obtenues à partir des vecteurs d'observation G et m pour fournir une estimation plus précise de l'attitude.

3.3.2.3. Exemples de résultats de simulation obtenus avec l'approche 2

Dans cette deuxième partie de simulation, nous allons montré quelques résultats théoriques de l'estimation de l'attitude en exploitant la structure de l'observateur à modes glissants (3.28), proposée dans l'approche 2. Nous considérons dans un premier temps trois vecteurs de mesures théoriques issus d'un gyromètre, d'un accéléromètre et d'un magnétomètre (voir figure 3.7). Ces mesures sont supposées enregistrées par le bio-logger attaché au corps de l'animal (voir figure 3.2) durant son mouvement. Afin de générer le modèle théorique du quaternion de mouvement (équation (3.1)), nous avons utilisé le vecteur de vitesse angulaire donné dans le tableau 3.4. Notons qu'au cours de la génération de ces données inertielles et magnétiques, un bruit blanc gaussien leur a été ajouté. Nous résumons dans le tableau 3.5 les caractéristiques de chaque bruit considéré sur les trois capteurs.

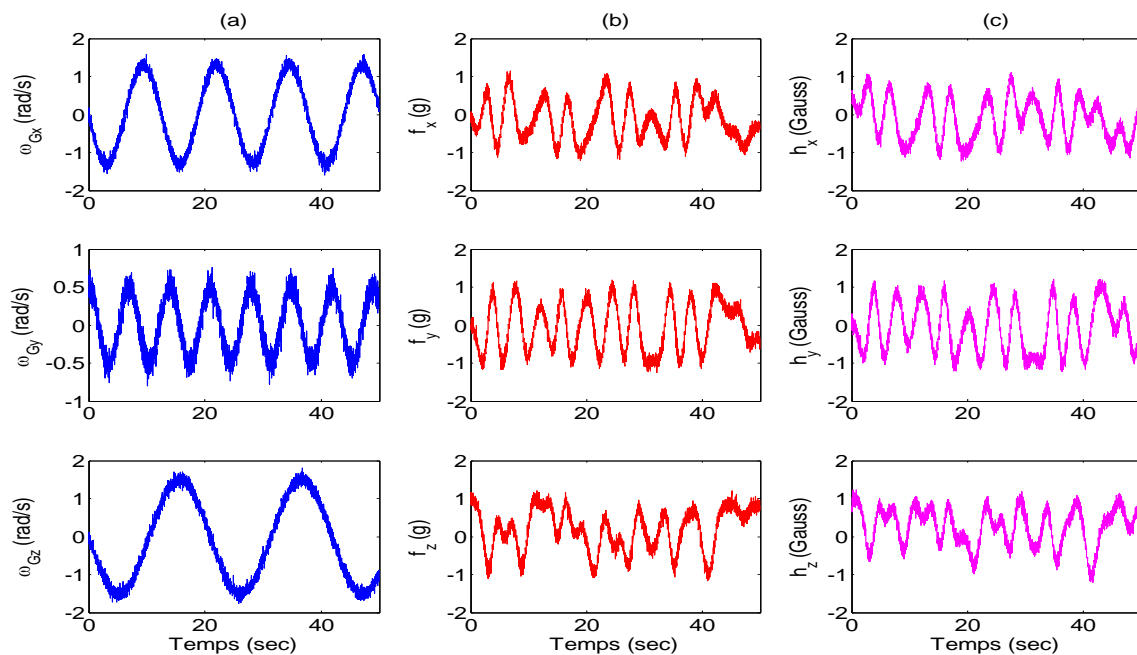


Fig. 3.7. Mesures simulées issues des capteurs - (a) vitesse angulaire - (b) accélération totale - (c) champ magnétique terrestre

L'épaisseur de la couche limite a été fixée à $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ et la constante de temps τ de l'algorithme de moindres carrés itératifs a été choisie à une valeur identique à celle prise dans l'approche 1 ($\tau = 1/3$). Les constantes k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 et k_6 utilisées dans (3.31) pour définir les gains K_1 et K_2 de l'observateur à modes glissants ont été fixées comme suit : $k_1 = k_2 = k_3 = 10^{-3}$ et $k_4 = k_5 = k_6 = 2 \cdot 10^{-3}$. Bien qu'il existe une plage de choix de ces gains garantissant la convergence, nous avons choisi les valeurs suivantes afin d'assurer une vitesse de convergence de l'observateur assez rapide tout en tenant compte du niveau de bruit choisi. Dans cette série de simulations, les états théoriques du modèle d'attitude considéré (quaternion) ont été initialisés avec des valeurs différentes de celles des états estimés par l'observateur. Ces états sont représentés par les quaternions suivants : $q(t_0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ et $\hat{q}(t_0) = [0.2 \ 0.5 \ 0.7 \ 0.3]^T$.

Vitesse angulaire	$0 < t \leq 50 \text{ sec}$
$\omega_x(t)$	$1.3 \sin(-0.5t)$
$\omega_y(t)$	$0.5 \cos(0.9t)$
$\omega_z(t)$	$-1.5 \sin(0.3t)$

Tab. 3.4. Exemple de vitesse angulaire simulée

Capteurs	Paramètres	Ecart types	Unités
Accéléromètre	δ_f	0.3	m/s^2
Magnétomètre	δ_h	0.3	Gauss
Gyromètre	δ_G	0.3	rad/sec

Tab. 3.5. Caractéristiques des bruits pour les mesures de chaque capteur

Afin d'illustrer la capacité de l'observateur à modes glissants à estimer le modèle de variation de l'attitude considéré, les évolutions temporelles des quaternions théorique q et estimé \hat{q} ont été représentées dans la figure 3.8. Bien que les deux quaternions aient été initialisés à des valeurs différentes, nous notons la convergence rapide des états estimés vers ceux de référence. De même, malgré le bruit dans les mesures des capteurs, le quaternion estimé poursuit le quaternion théorique. Ceci prouve la performance globale de l'observateur à modes glissants proposé.

Afin de quantifier l'erreur d'attitude, nous avons tracé dans la figure 3.9 les erreurs d'estimation des quatre composantes du quaternion en utilisant une différence entre le quaternion estimé et celui de référence. Deux échelles de représentation ont été utilisées

pour les périodes entre 0 et 5 sec et pour celles au delà de cet intervalle (un zoom entre 5 et 50 sec). La deuxième période illustre donc la convergence de cette erreur vers zéro au cours du mouvement simulé.

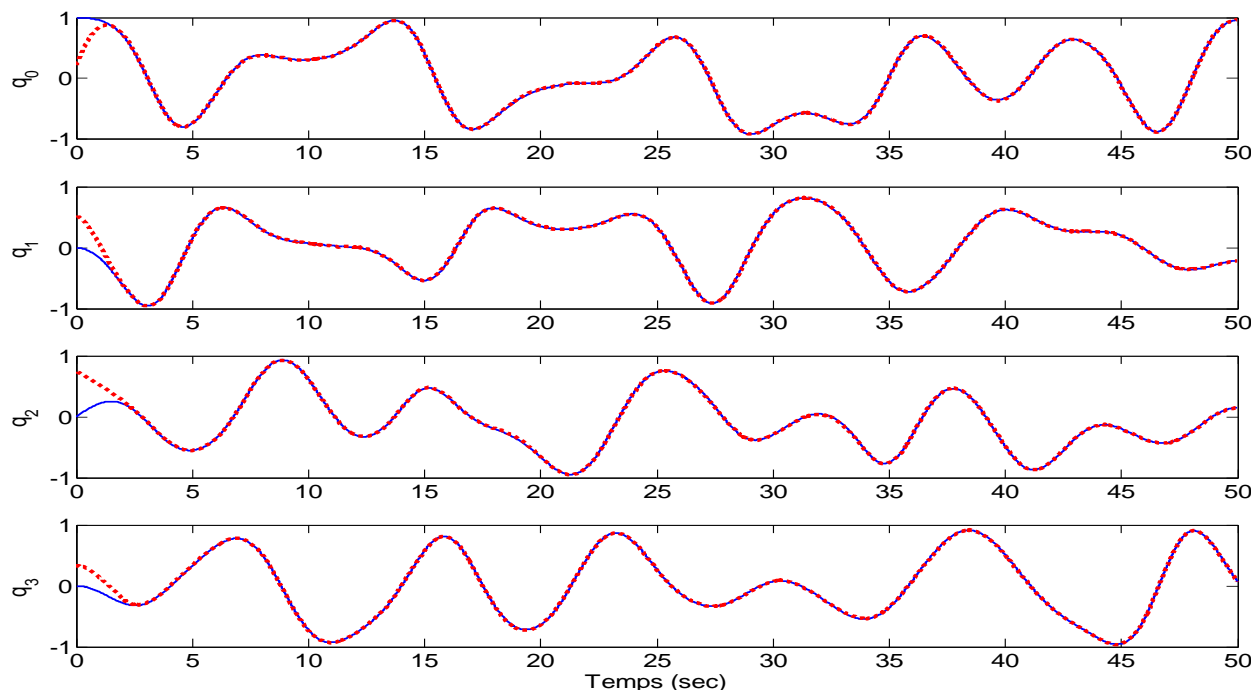


Fig. 3.8. Estimation des composantes du quaternion d'attitude par l'observateur à modes glissants: q (modèle de référence (—)), \hat{q} (les états estimés (- -))

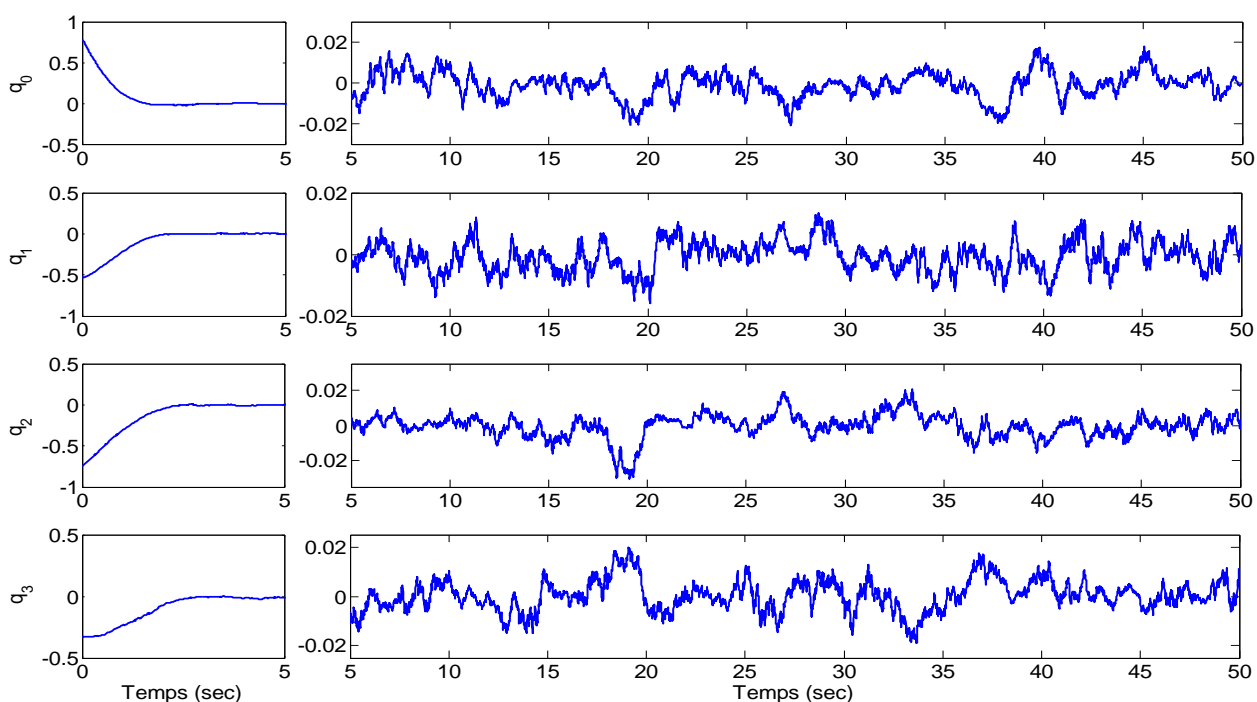


Fig. 3.9. Erreurs d'estimation sur les composantes du quaternion obtenues avec l'observateur à modes glissants (avec un zoom entre 5 et 50 sec)

3.3.3. Approche 3 : Estimation par filtre complémentaire à l'aide d'une technique de multiplication de quaternion

Dans les deux approches proposées précédemment, les structures d'observateurs utilisées englobent une phase de calcul préliminaire de l'attitude (quaternion de mesure q_m) à partir d'une fusion de mesures issues d'un accéléromètre et d'un magnétomètre triaxiaux. Cette combinaison est constituée d'une séquence itérative à base d'une technique de moindres carrés itératifs. Bien que le quaternion calculé soit bruité surtout lors des phases dynamiques du mouvement, il sert par la suite comme mesure aux observateurs pour corriger l'attitude estimée par le gyromètre. Cette étape engendre souvent un temps de calcul plus élevé. Pour cela, nous proposons dans cette section d'élaborer un filtre complémentaire qui utilise directement les mesures issues d'accéléromètre et de magnétomètre dans sa structure sans passer par une étape préliminaire de calcul de l'attitude et du biais gyrométrique (Fourati *et al.*, 2009d).

3.3.3.1. Système d'état considéré

De la même manière, nous utilisons l'équation cinématique d'un corps rigide en mouvement (3.1). En considérant que les mesures du gyromètre sont entachées de bruits, l'équation (3.1) est réécrite sous la forme (3.23). Afin de fusionner cette mesure de vitesse angulaire avec le reste des mesures (accélération et champ magnétique), nous considérons le système d'état (S_3), composé de l'équation (3.23) et du vecteur de sortie

$$y = \begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z & h_x & h_y & h_z \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^6 :$$

$$(S_3) : \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1\omega_x - q_2\omega_y - q_3\omega_z \\ q_0\omega_x - q_3\omega_y + q_2\omega_z \\ q_3\omega_x + q_0\omega_y - q_1\omega_z \\ q_1\omega_y - q_2\omega_x + q_0\omega_z \end{bmatrix} \\ y = \begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z & h_x & h_y & h_z \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (3.35)$$

où f_x , f_y , et f_z représentent les mesures de l'accéléromètre triaxial et h_x , h_y et h_z dénotent les mesures du magnétomètre triaxial.

3.3.3.2. Filtre complémentaire de l'attitude

Le but de cette approche est de faire un compromis entre la précision à court terme fournie par l'intégration des mesures du gyromètre et la précision à long terme obtenue par les mesures de l'accéléromètre et du magnétomètre. Afin de compenser les dérives sur l'estimation du quaternion qui sont observées lors de l'intégration de l'équation différentielle (3.35), un terme de correction T est introduit dans cette équation en se

basant sur une multiplication de quaternion. Nous proposons ainsi le filtre complémentaire (F) suivant (Fourati *et al.*, 2011a) :

$$(F) : \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{q}}_0 \\ \dot{\hat{q}}_1 \\ \dot{\hat{q}}_2 \\ \dot{\hat{q}}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\hat{q}_1\omega_x - \hat{q}_2\omega_y - \hat{q}_3\omega_z \\ \hat{q}_0\omega_x - \hat{q}_3\omega_y + \hat{q}_2\omega_z \\ \hat{q}_3\omega_x + \hat{q}_0\omega_y - \hat{q}_1\omega_z \\ \hat{q}_1\omega_y - \hat{q}_2\omega_x + \hat{q}_0\omega_z \end{bmatrix} \otimes T \end{cases} \quad (3.36)$$

où $\hat{q} = [\hat{q}_0 \ \hat{q}_1 \ \hat{q}_2 \ \hat{q}_3]^T \in \mathbb{H}^4$ représente les états estimés, exprimés par le quaternion de rotation. Le terme de correction T est calculé à partir d'une fusion de mesures issues d'accéléromètre et de magnétomètre. Le produit de quaternion introduit dans (3.36) permet ainsi d'élaborer la fusion entre les trois types de mesures inertielles et magnétiques.

Nous présentons maintenant la méthode permettant de calculer le terme de correction T . Pour cela, nous considérons l'erreur de modélisation $\delta(\hat{q}) = (y - \hat{y})$ sur les mesures du système (S_3). La sortie estimée \hat{y} est donnée par :

$$\hat{y} = [\hat{f}_x \ \hat{f}_y \ \hat{f}_z \ \hat{h}_x \ \hat{h}_y \ \hat{h}_z]^T \quad (3.37)$$

Les mesures estimées de l'accélération totale \hat{f}_x , \hat{f}_y , et \hat{f}_z peuvent être calculées en faisant l'hypothèse que les accélérations propres a sont faibles ($\|a\|_2 \ll \|G\|_2$). Ainsi on obtient :

$$\hat{f} = [0 \ \hat{f}_x \ \hat{f}_y \ \hat{f}_z]^T = \hat{q}^{-1} \otimes G_q \otimes \hat{q} \quad (3.38)$$

où $G_q = [0 \ 0 \ 0 \ 9.8]^T$ représente le quaternion pur associé au vecteur gravité $G = [0 \ 0 \ 9.81]^T$.

Les mesures estimées du champ magnétique \hat{h}_x , \hat{h}_y , et \hat{h}_z peuvent être calculées selon la forme suivante :

$$\hat{h} = [0 \ \hat{h}_x \ \hat{h}_y \ \hat{h}_z]^T = \hat{q}^{-1} \otimes m_q \otimes \hat{q} \quad (3.39)$$

Le vecteur champ magnétique terrestre est défini dans (1.39) par $m = [m_x \ 0 \ m_z]^T$ et le quaternion pur relatif est : $m_q = [0 \ m_x \ 0 \ m_z]^T$.

La minimisation de l'erreur de modélisation $\delta(\hat{q})$ est effectuée à partir d'une méthode de régression permettant de minimiser le critère d'erreur $\xi(q)$ lié à $\delta(\hat{q})$:

$$\xi(q) = \delta(\hat{q})^T \delta(\hat{q}) \quad (3.40)$$

Dans cette approche, l'Algorithme de Levenberg Marquardt a été choisi comme méthode de minimisation (Marquardt, 1963). Ce choix s'explique par la robustesse démontrée par cet algorithme par rapport à d'autres méthodes telles que celles de Gauss-Newton ou du gradient. Ainsi, la solution unique à ce problème peut s'écrire comme suit (Fourati *et al.*, 2009d ; Dennis et Schnabel, 1983) :

$$\eta(\hat{q}) = K \delta(\hat{q}) \quad (3.41)$$

où $K = k [X^T X + \lambda I_{3 \times 3}]^{-1} X^T$ représente le gain du filtre permettant de minimiser l'erreur $\delta(\hat{q})$ et $X \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ est la matrice Jacobienne définie par (Fourati *et al.*, 2009c) :

$$X = -2 \begin{bmatrix} [f^x] & [h^x] \end{bmatrix}^T = -2 \begin{bmatrix} 0 & -f_z & f_y & 0 & -h_z & h_y \\ f_z & 0 & -f_x & h_z & 0 & -h_x \\ -f_y & f_x & 0 & -h_y & h_x & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.42)$$

La constante λ est choisie de façon à assurer la non singularité du problème de minimisation. Généralement, dans ce type de filtre complémentaire, la constante k dans (3.41) détermine la fréquence de recouvrement de ce dernier. Le choix de la valeur de k entre $0 < k < 1$ (Mahony *et al.*, 2008) permet de privilégier soit les mesures du gyromètre, lors des hautes fréquences, soit celles de l'accéléromètre et du magnétomètre lors des basses fréquences. Le terme (3.41) constituera une partie du terme de correction T . Afin de pouvoir réaliser le produit de quaternion dans (3.36), le terme T doit être de dimension 4. Ainsi, T est construit de la façon suivante :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & & & & \\ 0 & & K & & & & \\ 0 & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \delta(\hat{q}) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

La partie scalaire du quaternion d'erreur $[1 \ \delta(\hat{q})]^T$ est choisie à 1 pour forcer le quaternion d'erreur à représenter des petits angles de rotation.

Finalement le filtre complémentaire (F) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$(F): \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{s}} \\ \dot{\hat{v}}_x \\ \dot{\hat{v}}_y \\ \dot{\hat{v}}_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -(\hat{v}_x \omega_x + \hat{v}_y \omega_y + \hat{v}_z \omega_z) \\ (\hat{s} \omega_x - \hat{v}_z \omega_y + \hat{v}_y \omega_z) \\ (\hat{v}_z \omega_x + \hat{s} \omega_y - \hat{v}_x \omega_z) \\ (\hat{v}_x \omega_y - \hat{v}_y \omega_x + \hat{s} \omega_z) \end{bmatrix} \end{cases} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & & & & \\ 0 & & K & & & & \\ 0 & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \delta(\hat{q}) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Le principe du filtre complémentaire d'attitude proposé est illustré par la figure 3.10.

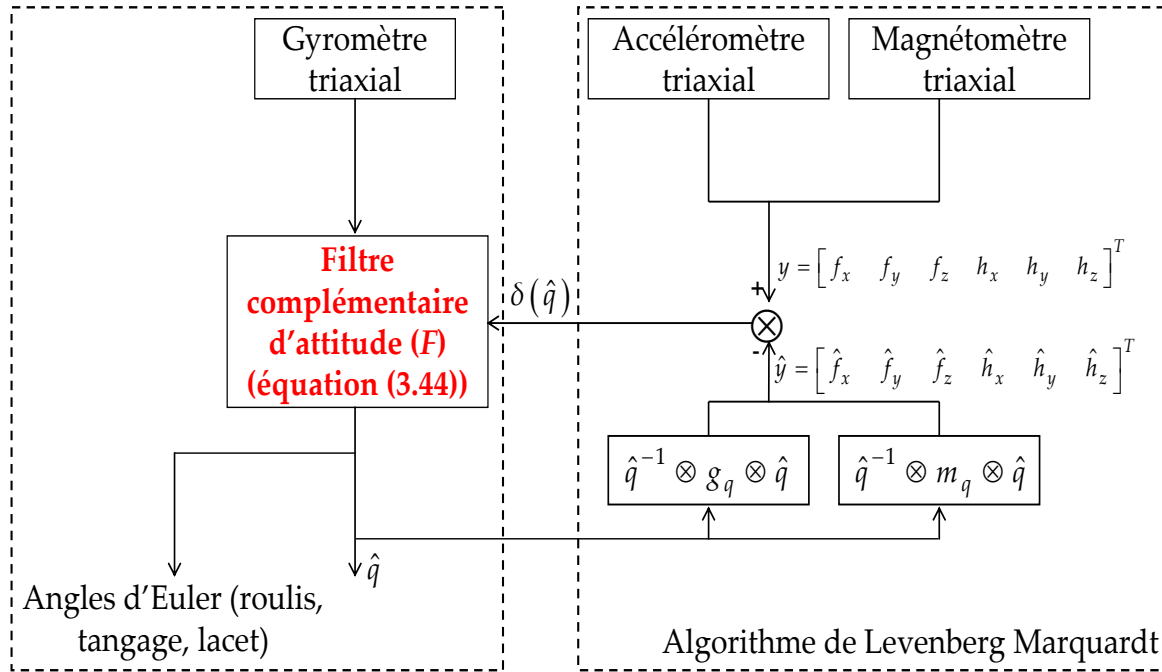


Fig. 3.10. Schéma bloc du filtre complémentaire de l'attitude

3.3.3.3. Analyse de performance du filtre complémentaire

Une analyse de fréquence des signaux de l'accéléromètre (équation (1.38)) montre que les composantes de la gravité G constituent les basses valeurs du spectre fréquentiel du signal alors que les accélérations propres a sont plutôt situées dans les régions à hautes fréquences du spectre (Gallagher *et al.*, 2004). De même, l'analyse fréquentielle des mesures du magnétomètre (équation (1.40)) montre que les composantes du champ magnétique terrestre m ont tendance à être liées aux basses fréquences de son spectre (Gallagher *et al.*, 2004). Les signaux issus du gyromètre (équation (1.41)) sont composés de deux termes essentiels : la vitesse angulaire réelle ω et le biais b . ω tend à avoir des composants ayant une fréquence élevée alors que le biais b est plutôt un processus à basse fréquence (Brown et Hwang, 1997). En conclusion, les signaux provenant d'une part de la paire de capteurs accéléromètre/magnétomètre et d'autre part du gyromètre possèdent des spectres de fréquences complémentaires (Gallagher *et al.*, 2004).

La structure résultante du filtre est alors complémentaire: elle chevauche les régions de basses fréquences des signaux issus de l'accéléromètre et du magnétomètre, où l'attitude est généralement plus précise, avec les régions de hautes fréquences des mesures issues du gyromètre, où l'intégration des vitesses angulaires produit des estimations de l'attitude plus fiables. En effet, l'approche proposée effectue un filtrage passe-bas sur les signaux provenant de l'accéléromètre et du magnétomètre et un filtrage passe-haut sur les signaux issus du gyromètre. En filtrant les composantes de hautes fréquences des signaux de l'accéléromètre (accélération propre : a) et celles de basses fréquences du signal du gyromètre (biais : b), le filtre complémentaire (3.44) produit une estimation de l'attitude meilleure que si ces capteurs sont utilisés séparément. Ces propriétés de filtrage complémentaire peuvent être prouvées mathématiquement (Fourati *et al.*, 2011a). Pour cela, nous considérons la structure linéarisée du filtre complémentaire de l'attitude (3.44) dans le domaine de Laplace. Cette structure est représentée par le schéma bloc dans la figure 3.11 (Fourati *et al.*, 2011a).

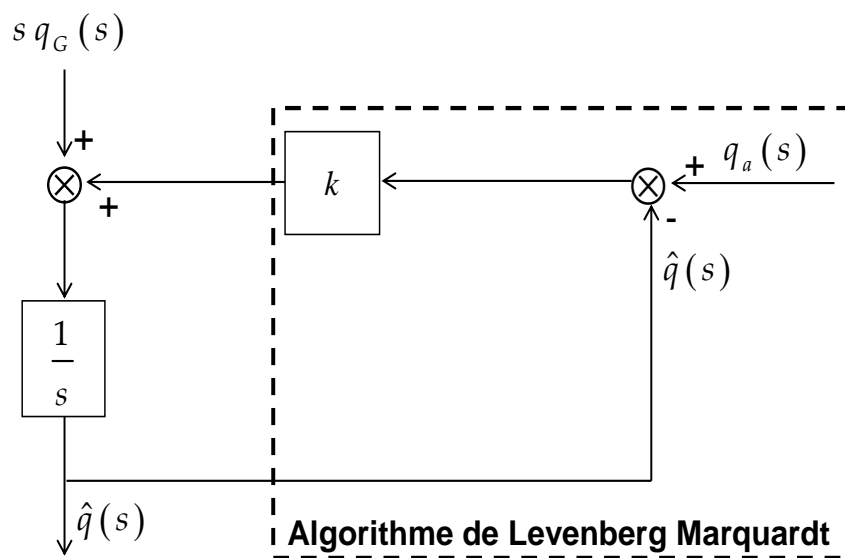


Fig. 3.11. Structure linéarisée du filtre complémentaire ramenée dans le domaine de Laplace

La transformée de Laplace du quaternion calculé par l'algorithme de Levenberg Marquardt (à partir des mesures accélérométriques et magnétométriques) est notée par $q_a(s)$. $s q_G(s)$ est la transformée de Laplace de \dot{q}_G (q_G est obtenu par intégration des mesures gyrométriques dans l'équation (3.1)). A partir de la figure 3.11, la fonction de transfert $F_1(s)$ qui correspond à l'utilisation unique des mesures provenant de l'accéléromètre et du magnétomètre est donnée par :

$$F_1(s) = \frac{\hat{q}(s)}{q_a(s)} = \frac{k s^{-1}}{1 + k s^{-1}} = \frac{k}{s + k} \quad (3.45)$$

L'équation (3.45) possède la forme d'un filtre passe-bas du premier ordre. Ainsi, les perturbations sur le quaternion de rotation $q_a(s)$ provenant des hautes fréquences du signal accélérométrique (accélération propre : a) sont filtrées. De même, à partir de la figure 3.11, la fonction de transfert $F_2(s)$ qui correspond à l'utilisation unique des mesures provenant du gyromètre est donnée par :

$$F_2(s) = \frac{\hat{q}(s)}{q_G(s)} = \frac{1}{1 + ks^{-1}} = \frac{s}{s + k} \quad (3.46)$$

La structure de l'équation (3.46) est celle d'un filtre passe-haut du premier ordre. Ainsi, les dérives sur le quaternion de rotation $q_G(s)$ provenant des basses fréquences du signal gyrométrique (biais : b) sont bien filtrées.

Finalement la condition requise pour un filtre complémentaire est satisfaite :

$$\frac{\hat{q}(s)}{q_a(s)} + \frac{\hat{q}(s)}{q_G(s)} = \frac{k}{s + k} + \frac{s}{s + k} = 1 \quad (3.47)$$

L'équation (3.47) confirme l'aspect complémentaire du filtre (voir annexe C.1). Finalement, la fonction de transfert globale de la structure linéarisée du filtre proposé dans la figure 3.11 peut s'écrire de la forme suivante :

$$\hat{q}(s) = \left(\frac{k}{s + k} \right) q_a(s) + \left(\frac{s}{s + k} \right) q_G(s) \quad (3.48)$$

Nous pouvons ainsi conclure que le filtre assure le chevauchement entre le filtrage passe-bas sur les signaux issus de la paire de capteurs accéléromètre/magnétomètre et le filtrage passe-haut sur les mesures du gyromètre.

3.3.3.4. Résultats de simulation obtenus avec l'approche 3

Nous finissons ce chapitre par des simulations représentatives des performances d'estimation du filtre complémentaire proposé dans (3.44). Comme précédemment, nous avons commencé cette série de simulation en générant trois vecteurs de mesures provenant d'une triade de capteurs formée d'un accéléromètre, d'un magnétomètre et d'un gyromètre. Cette triade est attachée au dos d'un manchot comme la montre la figure 3.2. Le modèle théorique du quaternion représentant l'attitude de l'animal est obtenu à partir de son propre vecteur de vitesse angulaire donné dans le tableau 3.6. Nous considérons que les mesures issues de cette triade de capteurs sont également entachées de bruit blanc gaussien (voir tableau 3.7). Une représentation graphique de l'ensemble de ces mesures est donnée dans la figure 3.12.

Vitesse angulaire	$0 < t \leq 15 \text{ sec}$	$15 \text{ sec} < t \leq 30 \text{ sec}$	$30 \text{ sec} < t \leq 50 \text{ sec}$
$\omega_x(t)$	$-1.1 \sin(1.2t)$	$-0.9 \sin(t)$	$-0.5 \sin(0.6t)$
$\omega_y(t)$	$0.7 \sin(0.9t)$	$1.2 \sin(-0.9t)$	$-0.7 \sin(-0.9t)$
$\omega_z(t)$	$1.5 \sin(-1.2t)$	$0.9 \sin(2t)$	$0.2 \sin(-0.5t)$

Tab. 3.6. Exemple de vitesse angulaire simulée

Capteurs	Paramètres	Ecart types	Unités
Accéléromètre	δ_f	0.4	m/s^2
Magnétomètre	δ_h	0.2	Gauss
Gyromètre	δ_g	0.2	rad/sec

Tab. 3.7. Caractéristiques des bruits considérés pour les mesures de chaque capteur

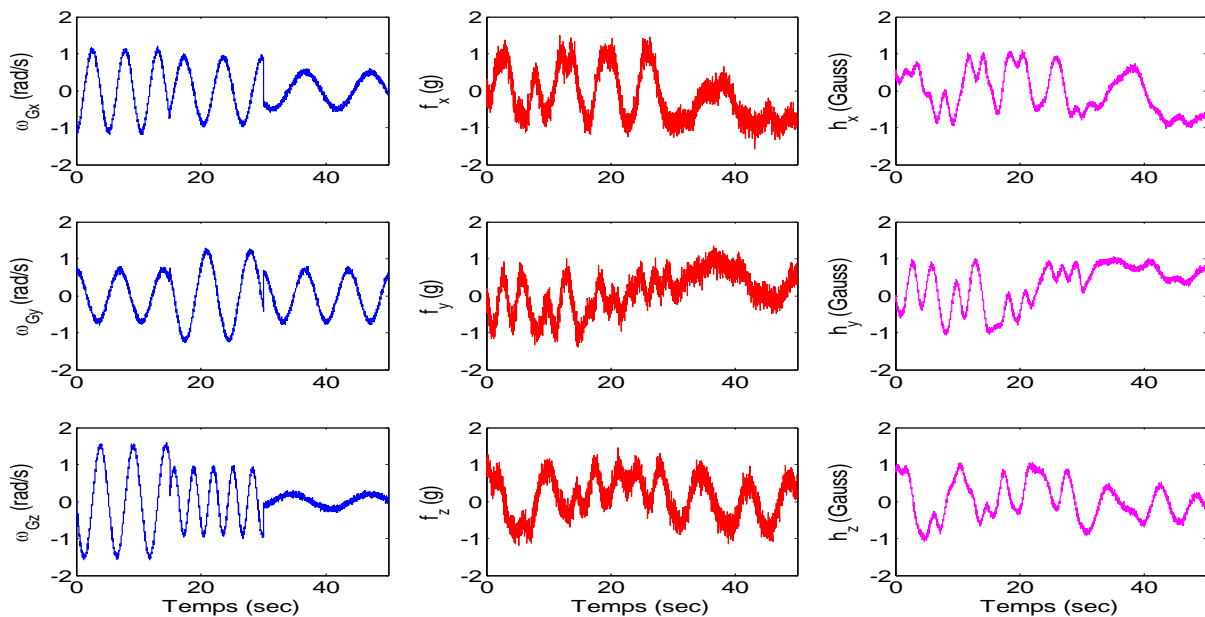


Fig. 3.12. Mesures simulées issues des capteurs - (a) vitesse angulaire - (b) accélération totale - (c) champ magnétique terrestre

Les composantes du modèle théorique du quaternion de rotation ainsi que les états estimés par le filtre complémentaire (3.44) sont initialisés avec des valeurs différentes choisies comme suit : $q(t_0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ et $\hat{q}(t_0) = [0.1 \ 0.9 \ 1 \ 0.7]^T$.

Le gain K , exprimé dans (3.41), est calculé à chaque étape d'intégration en exploitant les mesures issues de l'accéléromètre et du magnétomètre. La constante k dans ce gain est choisie telle que $k = 0.5$. Ce choix dépend du niveau de bruit choisi sur chaque capteur afin d'assurer le bon compromis entre les spectres fréquentiels des trois capteurs.

Il tient compte également de la vitesse de convergence du filtre. De même, la constante λ relative à l'Algorithme de Levenberg Marquardt est fixée à $\lambda = 10^{-2}$. Son choix dans une plage de valeurs intermédiaires (pas trop grand et pas trop petit) assure le mélange entre les deux méthodes de la descente du gradient et de l'approche quadratique (Marquardt, 1963). L'évolution temporelle du quaternion de référence ainsi que celle du quaternion estimé sont tracées dans la figure 3.13.

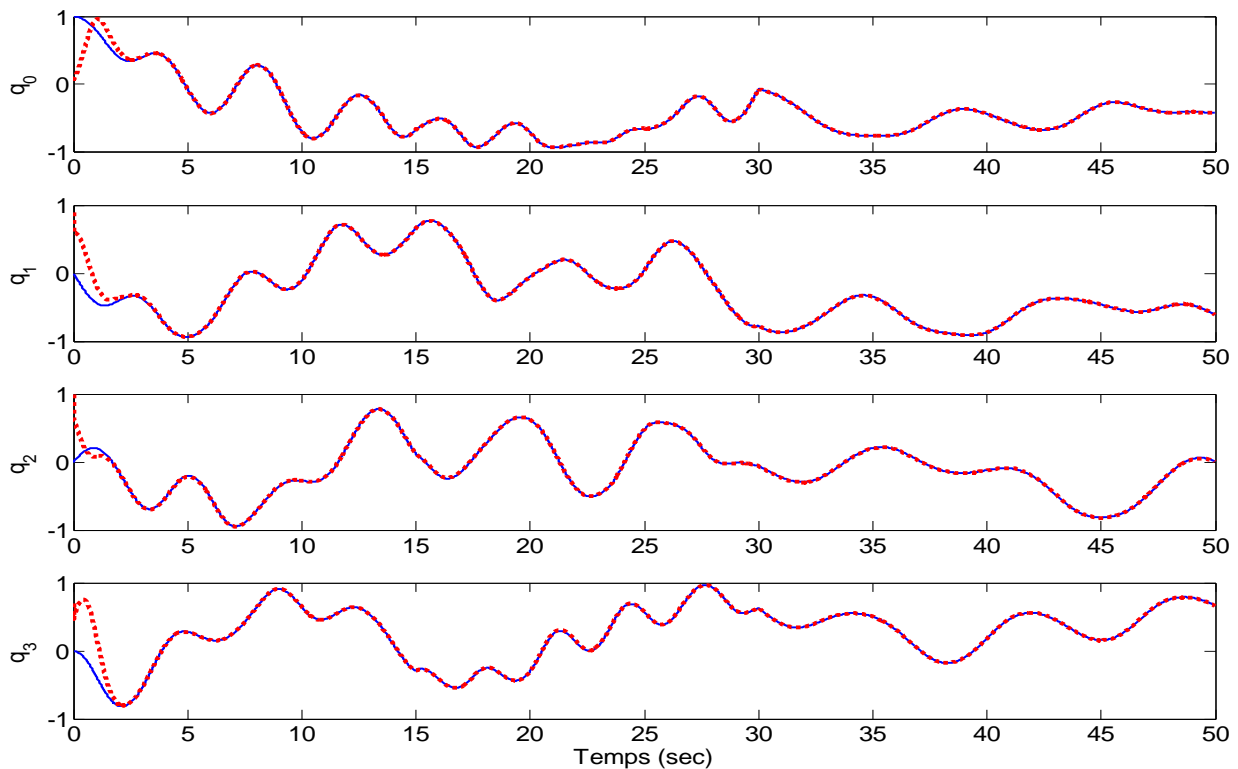


Fig. 3.13. Estimation des composantes du quaternion d'attitude par le filtre complémentaire : q (modèle de référence (—)), \hat{q} (les états estimés (- -))

Ce graphique témoigne de la capacité du filtre à reconstruire le quaternion théorique. Ce filtre converge au bout d'un temps estimé à $\ell \approx 2 \text{ sec}$. Il est important de signaler que les effets des différents bruits considérés sur chaque capteur sont atténués par ce filtre. La marge d'erreur d'estimation de l'attitude est évaluée dans les figures 3.14 et 3.15. Dans la figure 3.14, l'erreur d'estimation correspond à une différence entre les quatre composantes du quaternion estimé et celles du quaternion de référence.

Dans la figure 3.15, l'erreur d'estimation de l'attitude est représentée en utilisant la formule suivante : $E_q = \|(q^{-1} \otimes \hat{q}) - 1\|$ qui traduit l'erreur totale de l'ensemble des composantes du quaternion q . De même que précédemment, nous avons utilisé deux échelles de représentation, une pour les périodes entre 0 et 3 sec et l'autre pour celles au delà de cet intervalle (un zoom entre 3 et 50 sec). A partir des figures 3.14 et 3.15, nous remarquons la convergence rapide de ces erreurs vers zéro pour le mouvement simulé de

l'animal. En conclusion, les résultats obtenus montrent que ce filtre complémentaire est capable de reconstruire proprement l'attitude de référence même en présence de bruits non négligeables sur les capteurs utilisés.

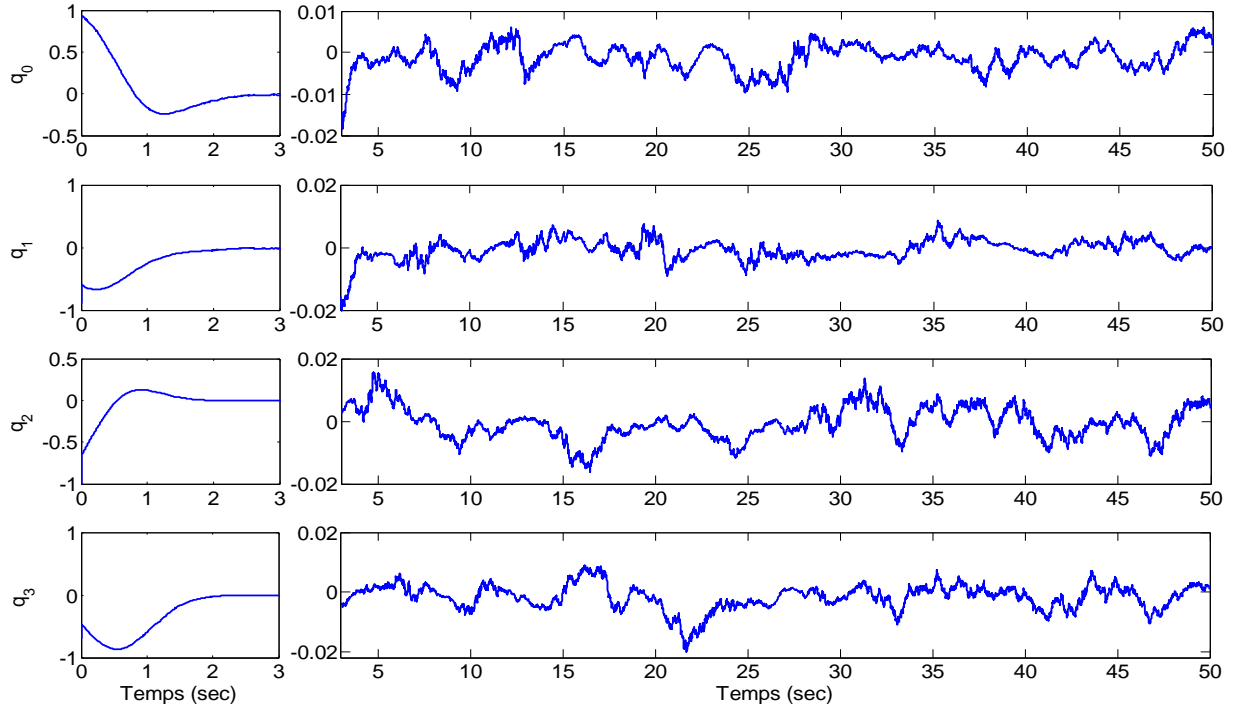


Fig. 3.14. Erreurs d'estimation sur les quatre composantes du quaternion obtenues avec le filtre complémentaire (avec un zoom entre 3 et 50 sec)

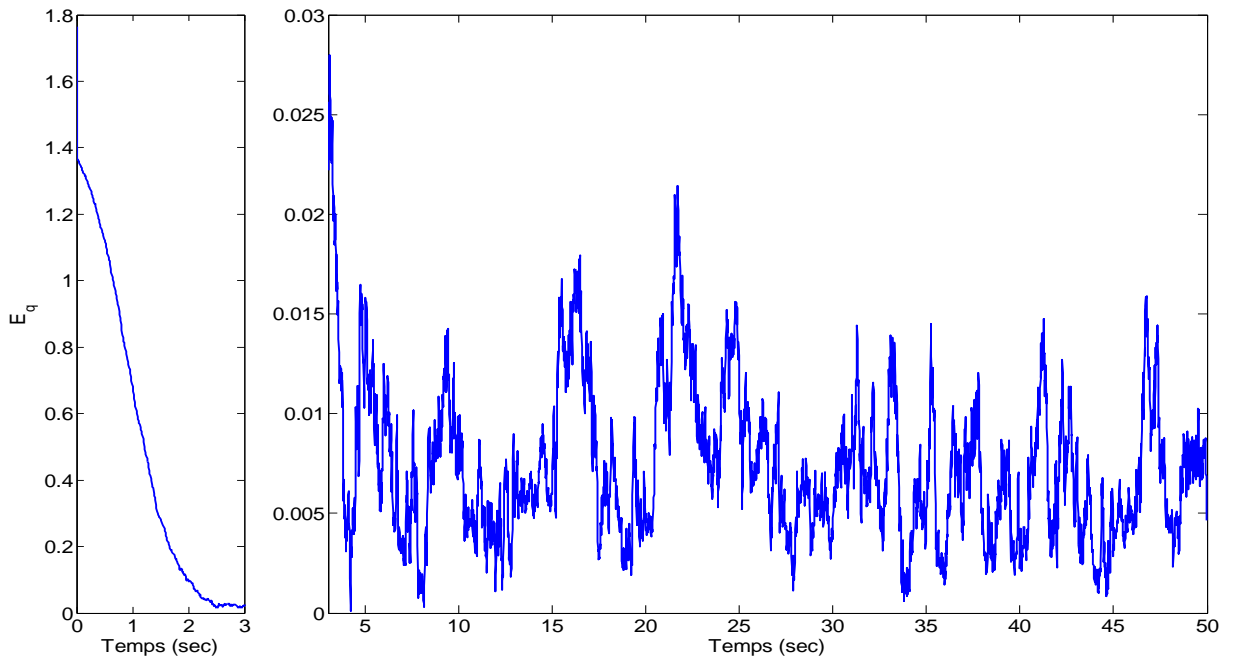


Fig. 3.15. Erreur d'estimation $E_q = \|(q^{-1} \otimes \hat{q}) - 1\|$ sur le quaternion obtenue avec le filtre complémentaire (avec un zoom entre 3 et 50 sec)

3.4. Synthèse et conclusion

Trois estimateurs de l'attitude d'un corps rigide ont été proposés dans ce chapitre en se basant sur deux principales théories : les observateurs et les filtres complémentaires. Ce choix s'explique par les performances qu'éprouvent ces deux types d'estimateurs vis-à-vis des Filtres de Kalman Etendu (FKE). Bien que le FKE ait été utilisé dans de nombreux travaux portant sur l'estimation de l'attitude, il réserve quelques inconvénients. Ils sont dus d'une part à l'approximation linéaire du modèle non linéaire de processus d'estimation de l'attitude (au voisinage de son estimation). Par conséquent, il est difficile de garantir la convergence globale du FKE (estimateur local) et des divergences pourraient être observées (comportement imprévisible du FKE (Tayebi, 2008)), notamment dans les situations où l'erreur d'estimation initiale et les erreurs de mesures sont grandes (Brown et Hwang, 1997). A cela s'ajoute le coût de calcul plus élevé souvent exigé par le FKE par rapport aux observateurs et aux filtres complémentaires, induit par le calcul de la matrice de covariance (solution de l'équation de Ricatti à chaque période d'échantillonnage).

L'application de ces approches est généralisée par la suite dans le cadre de la thématique principale de ce livre : le *Bio-logging*. Une triade de capteurs, formée par un accéléromètre, un magnétomètre et un gyromètre, est utilisée pour fournir les mesures nécessaires afin de reconstituer l'attitude sous forme de quaternion. Les trois estimateurs d'attitude sont proposés dans un ordre bien spécifique. La suggestion à chaque fois d'une nouvelle approche se fait à la base de deux idées essentielles : prendre en compte des points limitants de la méthode précédente et la simplification du taux de calcul tout en gardant les mêmes performances. Ces deux lignes directives nous ont permis de proposer à la fin une structure de filtre complémentaire plus simple et ayant de bonnes performances lors de la manipulation des quaternions.

L'approche 1 a été synthétisée en s'inspirant d'une structure usuelle d'un observateur d'état déjà proposé dans (Salcudean, 1991) pour estimer les vitesses et les moments angulaires d'un corps rigide dans l'espace et restructuré dans (Thienel et Sanner, 2003 ; Guerrero-Castellanos, 2008). Cette première méthode, basée sur l'observateur non linéaire additif (3.7), permet par contre de reconstruire les orientations 3D sous forme de quaternion. Une étape d'estimation et de recalage du biais dans les gyromètres a été aussi prévue. Rappelons que l'estimation du quaternion est effectuée sur deux étapes, une première qui calcule un quaternion algébrique q_m à l'aide d'une méthode optimale itérative exploitant les mesures issues d'accéléromètre et de magnétomètre. Dans la deuxième étape, q_m est utilisé comme quaternion de mesure à l'observateur pour le fusionner avec le quaternion obtenu par l'intégration des mesures issues du gyromètre et obtenir à la fin le quaternion estimé \hat{q} . A la différence des observateurs usuels, le calcul de l'erreur est défini par l'algèbre des quaternions (produit de quaternion \otimes). La phase de correction ou de mise à jour du quaternion estimé est effectuée par une simple addition de quaternion. En examinant en détails l'algèbre des quaternions, il paraît que lors du

passage entre quaternion, la technique de mise à jour par addition n'est pas très commode (Koprubasi et Thein, 2006) et peut provoquer souvent des divergences au niveau du calcul du quaternion. Il est très connu au sein de l'algèbre des quaternions que la technique de mise à jour par multiplication est plus adaptée à ce type de nombre et respecte mieux ses propriétés intrinsèques. Elle permet toujours le passage entre les quaternions.

Partant de ce point, nous nous sommes penchés dans l'approche 2 à proposer une méthode faisant intervenir plutôt un produit de quaternion lors de la phase de mise à jour du quaternion estimé. Nous rappelons que cette technique a été rarement utilisée dans la littérature pour traiter la problématique d'estimation de l'attitude. Dans ce cadre, nous avons proposé l'observateur à modes glissants (3.28). Le choix de ce concept s'explique par les propriétés inhérentes de robustesse relatives à ce type d'observateur. En effet, le mouvement résultant de la dynamique d'erreur, appelé mouvement glissant, est souvent peu sensible à toutes les incertitudes ou signaux extérieurs de perturbation (Fossard et Floquet, 2002). Quelques changements radicaux y sont apportés par rapport à la forme usuelle d'un tel observateur dans le but de satisfaire quelques propriétés intrinsèques des quaternions. Alors que le calcul de l'attitude a été maintenu à deux étapes comme lors de la méthode précédente, nous avons choisi par contre d'éliminer la phase d'estimation du biais dans le gyromètre. A notre connaissance, ce biais pourrait être recalé automatiquement en effectuant la fusion fréquentielle complémentaire entre les trois mesures inertielles et magnétiques.

En poursuivant notre volonté de simplification des approches d'estimation de l'attitude, nous nous sommes proposés dans l'approche 3 de concevoir une méthode alternative à base du filtre complémentaire (3.44) qui garde la même technique de mise à jour du quaternion estimé (par multiplication de quaternion). Par ailleurs, l'estimation du quaternion est accomplie en une seule étape. En effet, les mesures issues de chaque capteur sont exploitées directement dans la structure du filtre de façon complémentaire sans passer par une étape intermédiaire de calcul d'un quaternion de mesure q_m , comme c'était le cas dans les deux approches précédentes. A notre connaissance, cette technique permet de réduire considérablement le temps de calcul et de minimiser les erreurs d'estimation de l'attitude.

Une série de simulations théoriques a été réalisée à la suite de chaque approche afin d'évaluer leurs performances. Pour chaque méthode, nous avons considéré un exemple théorique de variation du quaternion représentant le mouvement d'un animal (manchot). Le but est d'estimer chaque modèle théorique par l'estimateur approprié. Nous avons considéré également des mesures théoriques issues d'une triade de capteurs MEMS formée par un accéléromètre, un magnétomètre et un gyromètre (représente la base du prototype lors de notre application finale). A ces mesures nous avons ajouté des bruits gaussiens suffisamment grands pour représenter les imperfections et les erreurs

observées sur ces types de capteurs. Les résultats obtenus, principalement les erreurs d'estimation de l'attitude, illustrent les performances des estimateurs proposés pour les exemples théoriques de quaternions simulés. En conclusion, nous sommes arrivés dans l'approche 3 à simplifier le processus d'estimation de l'attitude sans perdre de précision. Cependant, ces exemples restent limités et ne peuvent pas englober tous les cas des mouvements réels d'un animal. Ceci est vrai aussi pour les mesures inertielles et magnétiques simulées dans la proportion où il est difficile de reproduire fidèlement les sorties de ces capteurs.

Pour cela, le chapitre 4 sera consacré à des essais expérimentaux avec des mesures réelles et pour des cas de mouvements réalistes sur des humains et des animaux domestiques. Le but est de conforter les résultats théoriques déjà obtenus dans le chapitre 3 et d'étendre ces phases de tests à des mouvements similaires à ceux qui seront probablement observés sur le manchot ou le blaireau.

Chapitre 4

Evaluations expérimentales des algorithmes d'estimation de l'attitude

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une validation expérimentale des performances d'estimation de l'attitude en utilisant une centrale inertielle du marché qui fournit à sa sortie les mesures d'accélération, de champ magnétique et de vitesse angulaire en plus des points GPS. Cette centrale permet, par son algorithme interne exploitant l'ensemble de ces données, de fournir un calcul de l'attitude que nous considérons comme référence de comparaison.

Nous proposons, dans une première partie d'illustrer par un essai expérimental préliminaire les performances de nos approches. Au cours de ce premier essai, le mouvement réalisé avec la centrale d'attitude est composé d'une phase statique suivie d'une autre plutôt dynamique. Dans un deuxième essai, nous validons nos algorithmes au cours du mouvement d'un membre humain. Le troisième essai est consacré à une synthèse de résultats d'estimation de l'attitude au cours des mouvements de deux animaux : le chien et le cheval. Nous consacrons la deuxième et dernière partie de ce chapitre à une analyse de performances des estimations de l'attitude en les comparant d'abord à une centrale d'attitude du marché, ensuite à des méthodes développées en *Bio-logging*.

4.2. Outils et dispositifs expérimentaux utilisés

Afin d'évaluer expérimentalement les performances des trois estimateurs de l'attitude, proposés dans le chapitre 3, sur des applications concrètes, nous avons opté pour l'utilisation de mesures inertielles et magnétiques réelles. Ces données sont fournies à

partir d'une triade de capteurs formée par un accéléromètre triaxial, un magnétomètre triaxial et un gyromètre triaxial.

L'étude menée à la fin du chapitre 2 autour des centrales d'attitude et inertielles commercialisées sur le marché, nous a conduit à choisir deux modèles de la même compagnie appelée *Xsens Technologies* (Xsens Technologies, 2010). Ils sont représentés dans la figure 4.1 par la centrale d'attitude *MTi* et la centrale inertielle *MTi-G*.

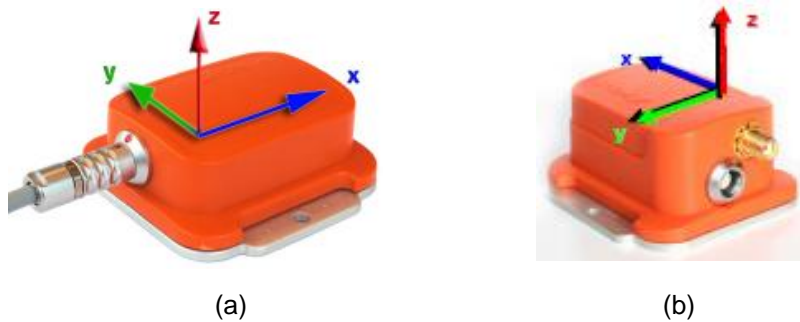


Fig. 4.1. (a) Centrale d'attitude *MTi* - (b) Centrale inertielle *MTi-G*

Nous avons opté pour ces deux modèles parce que nous avons remarqué qu'ils sont les plus utilisés dans les applications de recherches et industrielles. A titre d'exemple, la majorité des véhicules volants de l'**ONERA**⁴⁷ les utilisent dans leurs travaux de recherches. Ces deux centrales sont chères (plus de 2000 euro) et présentent des options d'utilisation qui nous permettent de réaliser rigoureusement les différents essais expérimentaux. Ces deux unités miniatures et légères sont constituées par les mêmes capteurs inertiels et magnétiques à la différence près (mais pas négligeable) que la *MTi-G* intègre en plus un module GPS. Cela nous offre l'avantage d'avoir par la suite un large panel de comparaison. Le tableau 4.1 résume les principales caractéristiques techniques des capteurs inertiels et magnétiques formant la *MTi* et la *MTi-G* (Xsens Technologies, 2010).

Performance de chaque capteur	Vitesse angulaire	Accélération	Champ magnétique
<i>Etendue de mesure</i>	$\pm 300 \text{ deg/ s}$	$\pm 50 \text{ m / s}^2$	$\pm 750 \text{ mGauss}$
<i>Biais</i>	1 deg/ s	0.02 m / s^2	0.1 mGauss
<i>Bruit</i>	$0.05 \text{ deg/ s} / \sqrt{\text{Hz}}$	$0.002 \text{ m / s}^2 / \sqrt{\text{Hz}}$	0.5 mGauss
<i>Erreur d'alignement</i>	0.1 deg	0.1 deg	0.1 deg

Tab. 4.1. Caractéristiques techniques des mesures issues des capteurs de la *MTi* et la *MTi-G*

Un port USB assure la liaison entre chaque unité et l'ordinateur. Leurs mécanismes de fonctionnement sont représentés dans la figure 4.2. L'utilisateur dispose de logiciel

⁴⁷ **ONERA** : Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques

d'acquisition *MT Manager v1.4.0* et de paramétrage (Figure 4.3), développés par Xsens, pour récupérer et visualiser les données numériques de sortie à savoir l'accélération 3D, la vitesse angulaire 3D et le champ magnétique terrestre 3D, échantillonnées à un taux de 100 Hz. Les sorties de ces capteurs sont compensées en interne de l'effet de la variation de la température et de l'ensemble des biais. Ces deux unités permettent également de calculer l'attitude 3D et de la récupérer par la suite à l'aide du logiciel d'acquisition sous forme de quaternion, d'angles d'Euler ou de matrice de rotation à un taux d'échantillonnage de 100 Hz. Il faut préciser que l'attitude est calculée en interne à l'aide d'un filtre de Kalman **XKF**⁴⁸ pour la *MTi* et d'un filtre de Kalman étendu **XEKF**⁴⁹ pour la *MTi-G* (Xsens Technologies, 2010). Les deux unités sont livrées dans des boîtiers de protection, ce qui a pour avantage de limiter les risques de choc avec les composants internes, mais également d'avoir une température homogène des capteurs. Enfin, le constructeur recommande d'utiliser ces unités 10 minutes après avoir été branchées, pour laisser le temps aux composants d'atteindre la température de fonctionnement.

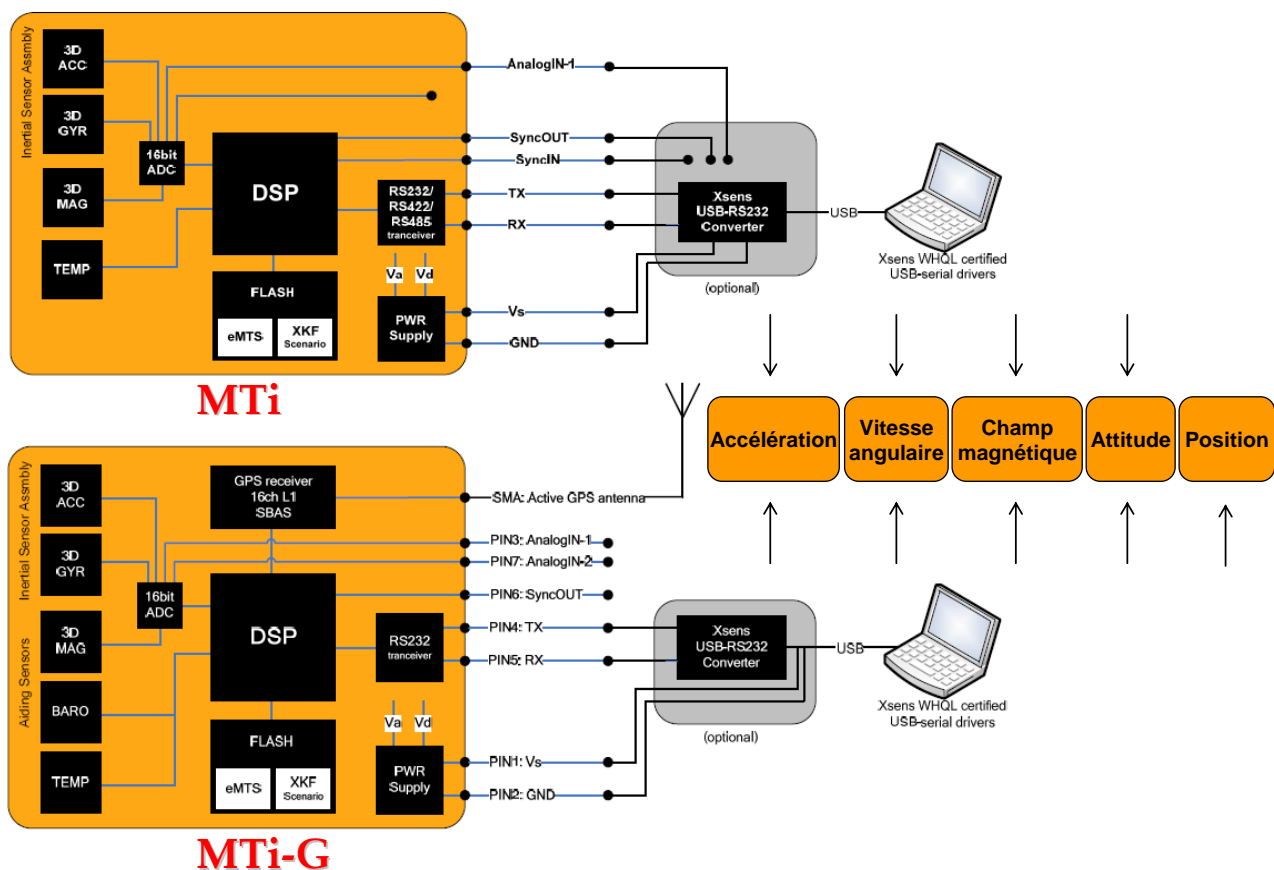


Fig. 4.2. Mécanismes de fonctionnement de la centrale d'attitude *MTi* et de la centrale inertielle *MTi-G*

Il est important de noter que ces unités ne sont pas appropriées pour être déployées directement sur des animaux en liberté en raison de l'absence d'une source d'énergie

⁴⁸ **XKF** : Xsens Kalman Filter

⁴⁹ **XEKF** : Xsens Extended Kalman Filter

autonome pouvant les faire fonctionner. Leurs conceptions actuelles ne sont pas également adaptables aux milieux marins par exemple. Nous les utilisons uniquement comme outil d'évaluation des performances d'estimation de l'attitude des trois estimateurs proposés. Nous considérons alors que les triades de capteurs attachées à la *MTi-G* et à la *MTi* forment un corps rigide et que leurs axes orthogonaux sont ceux du système de coordonnées mobiles (B). Les algorithmes internes de ces centrales utilisent la configuration NED comme système de coordonnées fixes lié à la terre.

Interface graphique 3D

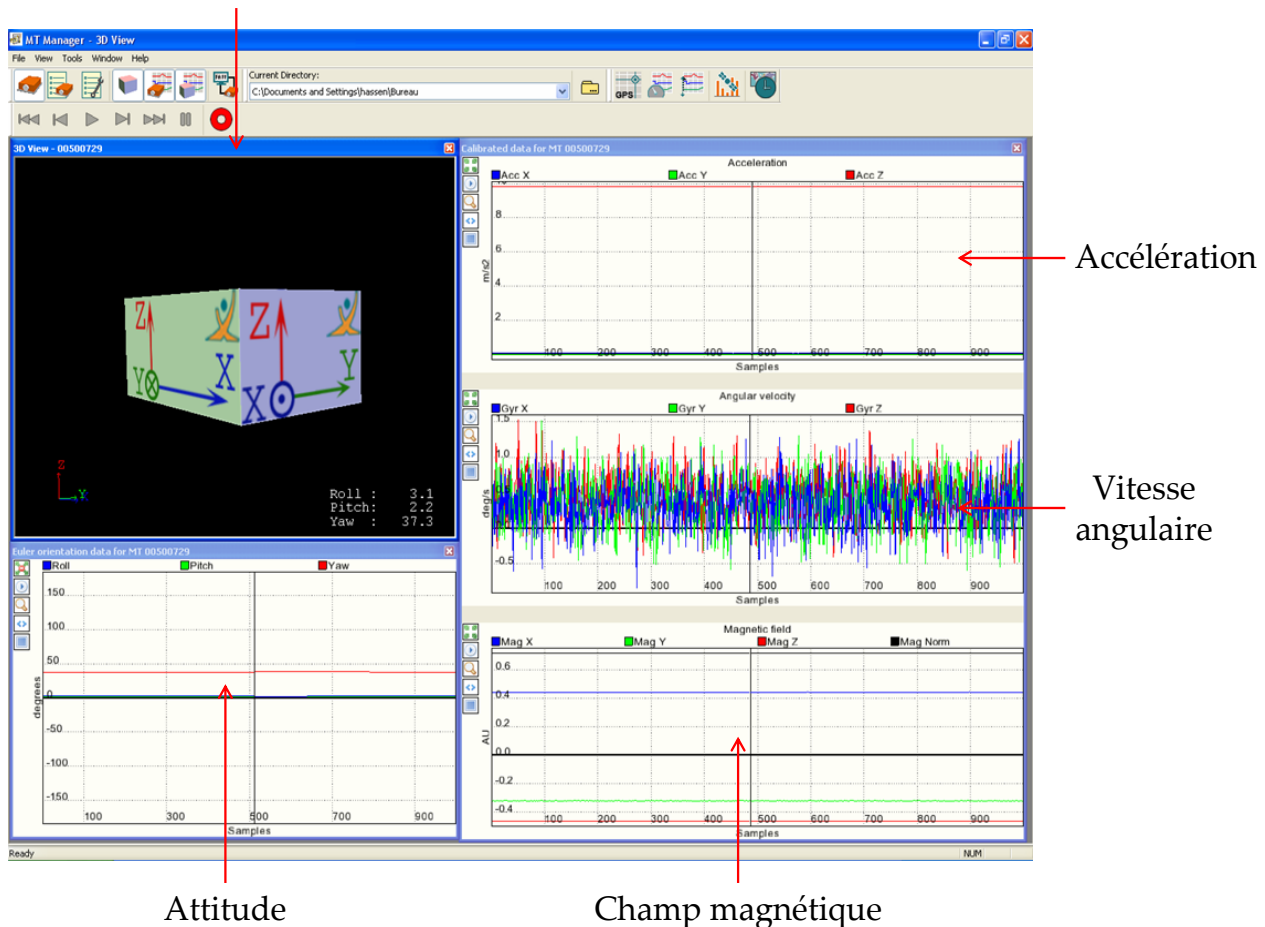


Fig. 4.3. Interface graphique du *MT Manager v1.4.0*

4.3. Validation préliminaire des approches d'estimation de l'attitude

Nous commençons la série des évaluations expérimentales de nos approches théoriques par des essais préliminaires d'estimation de l'attitude. Pour cela nous avons sélectionné la centrale inertielle *MTi-G* comme outil expérimental de mesure. La centrale inertielle *MTi-G* nous permet à travers son logiciel d'acquisition *MT Manager v1.4.0* de récupérer l'ensemble des mesures d'accélération, de champ magnétique et de vitesse angulaire durant l'essai réalisé et de les enregistrer en même temps sur le disque dur de l'ordinateur. De même, nous avons enregistré avec la *MTi-G* les données de l'attitude correspondant au mouvement réalisé. Notons que l'attitude obtenue est sous forme de

quaternion. Par ailleurs, afin d'avoir des résultats plus intuitifs, nous avons procédé à une transformation mathématique nous permettant ainsi le passage des quaternions vers les angles d'Euler. Les formules nécessaires à ce passage sont détaillées en annexe D.1.

Le mouvement que nous avons choisi de réaliser avec la *MTi-G* est relativement simple. Il se divise en deux périodes : une première où la *MTi-G* est statique suivie d'une deuxième où elle est plutôt dynamique.

4.3.1. Résultats obtenus lors d'une phase statique de mouvement

Cet essai expérimental est entamé par une phase statique où la *MTi-G* est laissée immobile pendant une minute tout en lui choisissant une orientation spatiale quelconque. Les mesures inertielles et magnétiques enregistrées durant cette période sont fournies aux différents estimateurs proposés dans le chapitre précédent pour reconstituer l'attitude de la *MTi-G*.

Afin de juger de la performance globale d'estimation, nous avons tracé dans les figures 4.4, 4.5 et 4.6 les erreurs d'estimation commises sur les angles d'Euler. Ces erreurs sont calculées à partir d'une simple différence entre les valeurs estimées par chaque approche et les valeurs calculées à partir de la *MTi-G*. Nous rappelons que les valeurs estimées de l'attitude sont obtenues, respectivement, à partir de l'observateur non linéaire additif (3.7), de l'observateur à modes glissants (3.28) et du filtre complémentaire (3.36). Deux échelles de représentation ont été utilisées pour la période entre 0 et 5 sec et celle au delà de cette intervalle (avec un zoom entre 5 et 60 sec). Les résultats montrés dans ces figures indiquent que ces erreurs varient dans une zone très proche de zéro ce qui témoigne de la capacité de chaque estimateur à reconstruire l'attitude de la *MTi-G* dans laquelle elle a été placée.

Nous pouvons conclure aussi que les divergences sur l'estimation de l'attitude qui peuvent surgir à cause de l'effet du biais gyrométrique ont été bien réduites par les trois estimateurs proposés. Notons bien que la structure de l'observateur à modes glissants (3.28) et celle du filtre complémentaire (3.36) ne possèdent pas d'étape d'estimation/correction du biais présent dans les gyromètres, comme c'est le cas dans l'observateur non linéaire additif (3.7). Cependant, nous remarquons que l'estimation de l'attitude est insensible à l'élimination de cette étape et qu'il est possible de maintenir les mêmes performances d'estimation. Cela confirme l'hypothèse avancée dans le chapitre 3 et qui indique qu'il est possible de corriger les divergences de l'attitude dues à l'effet du biais gyrométrique à l'aide de la fusion des trois mesures inertielles et magnétiques sans avoir recours à une étape intermédiaire d'estimation/correction de ce dernier.

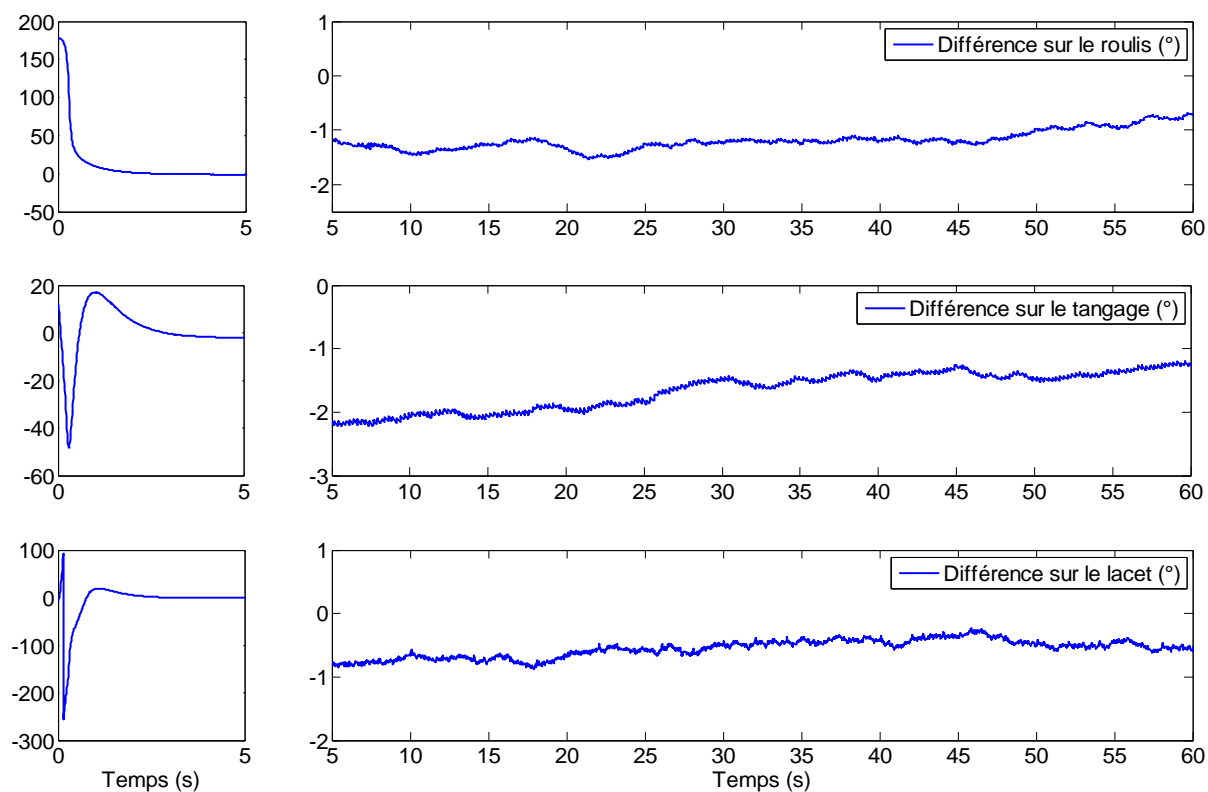


Fig. 4.4. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G* lors d'une phase statique (avec un zoom entre 5 et 60 sec)

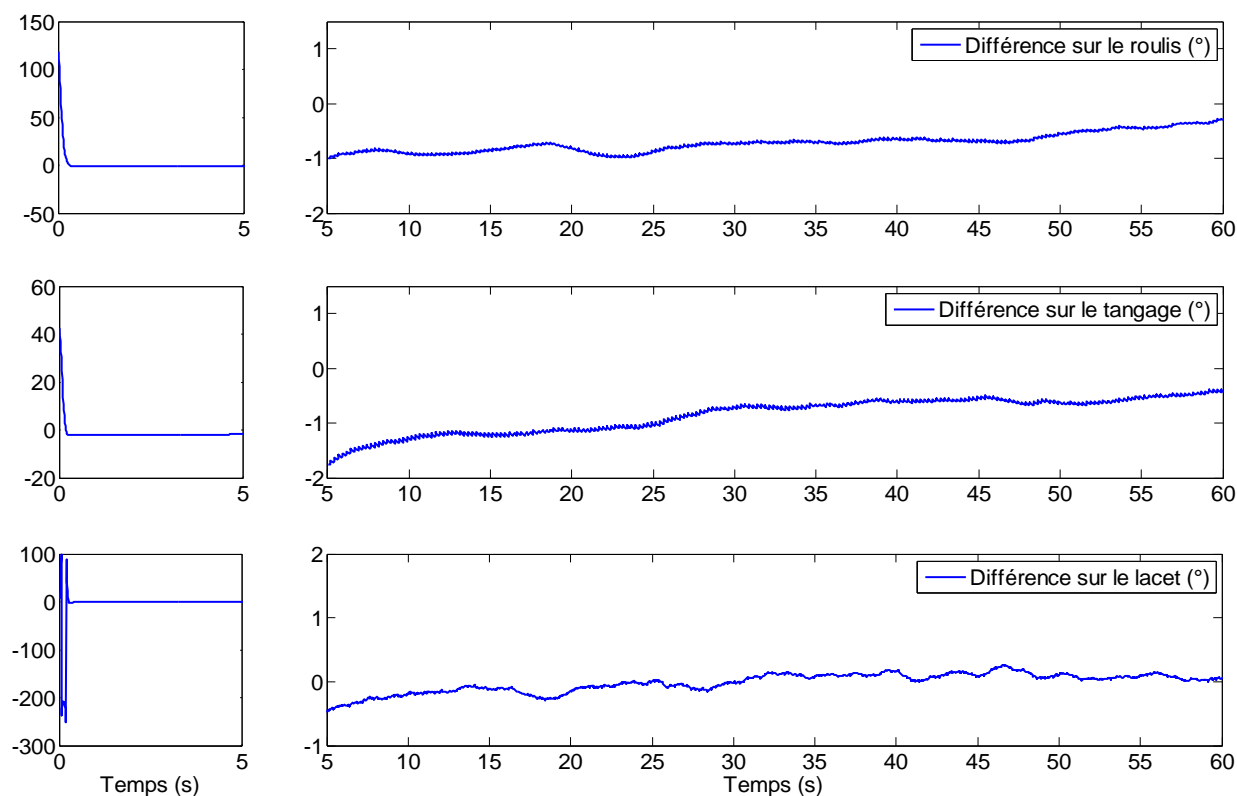


Fig. 4.5. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G* lors d'une phase statique (avec un zoom entre 5 et 60 sec)

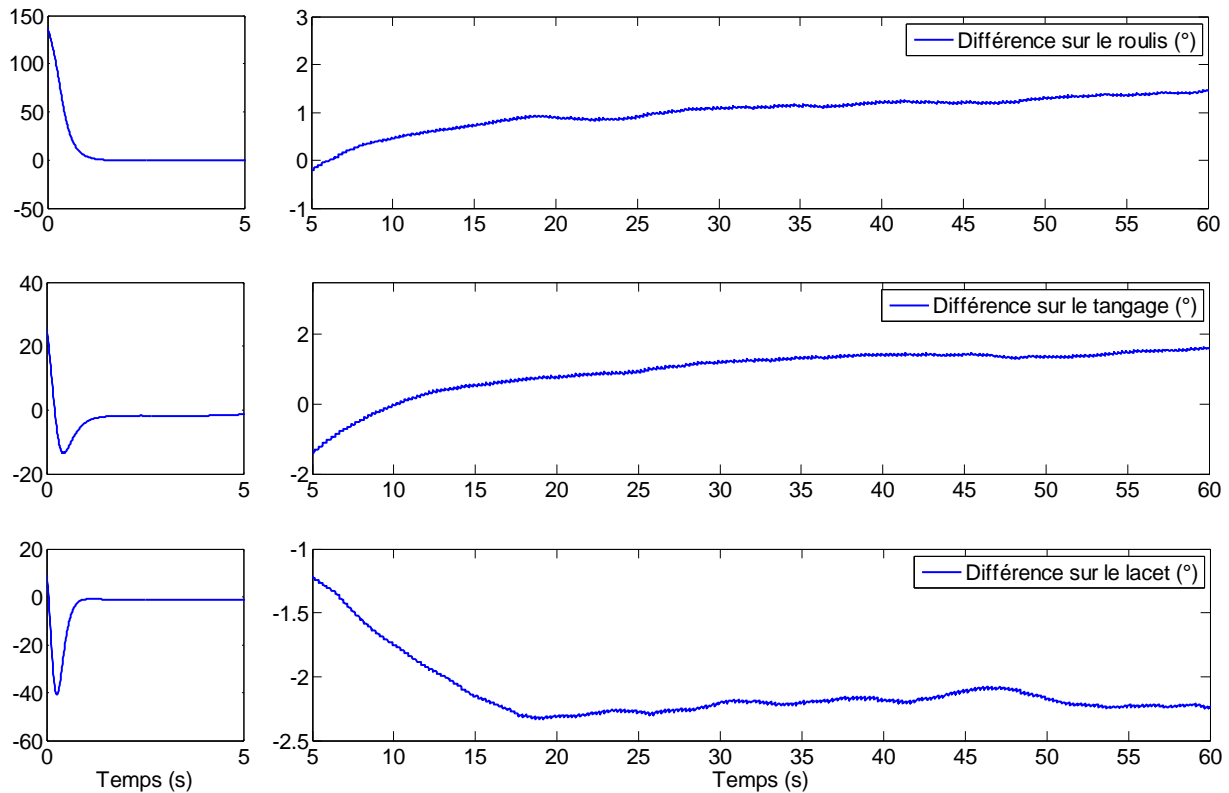


Fig. 4.6. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire et ceux calculés par la *MTi-G* lors d'une phase statique (avec un zoom entre 5 et 60 sec)

4.3.2. Résultats obtenus lors d'une phase dynamique de mouvement

Lors de la deuxième période de cet essai expérimental (entre 60 et 120 sec), nous avons considéré une situation plutôt dynamique dans laquelle la centrale d'attitude *MTi-G* est tournée avec la main dans toutes les directions de l'espace. De la même façon, les mesures inertielle et magnétique enregistrées durant cette période sont fournies aux différents estimateurs proposés pour reconstruire l'attitude de la *MTi-G*.

Dans le but d'examiner les performances globales d'estimation de l'attitude, nous avons également tracé dans les figures 4.7, 4.8 et 4.9, respectivement, les erreurs d'estimation sur les angles d'Euler relatives à l'observateur non linéaire additif, à l'observateur à modes glissants et au filtre complémentaire. Ces erreurs sont calculées de la même façon que celle utilisée lors de la phase statique. Nous remarquons à partir de ces figures que les erreurs d'estimation relatives à chaque approche restent toujours proches de zéro bien que le style de mouvement soit différent et que les mesures de l'accéléromètre sont entachées de vibrations et d'accélérations propres dues au mouvement. Ces résultats témoignent de la capacité de chaque estimateur à reconstruire l'attitude de la *MTi-G* même pendant la phase dynamique du mouvement considérée.

Les résultats d'estimation de l'attitude au cours de cet essai expérimental ont été encourageants et nous ont permis de passer à des cas de mouvements plus complexes, plus rapides et plus proches de ceux observés lors de notre application finale sur l'animal.

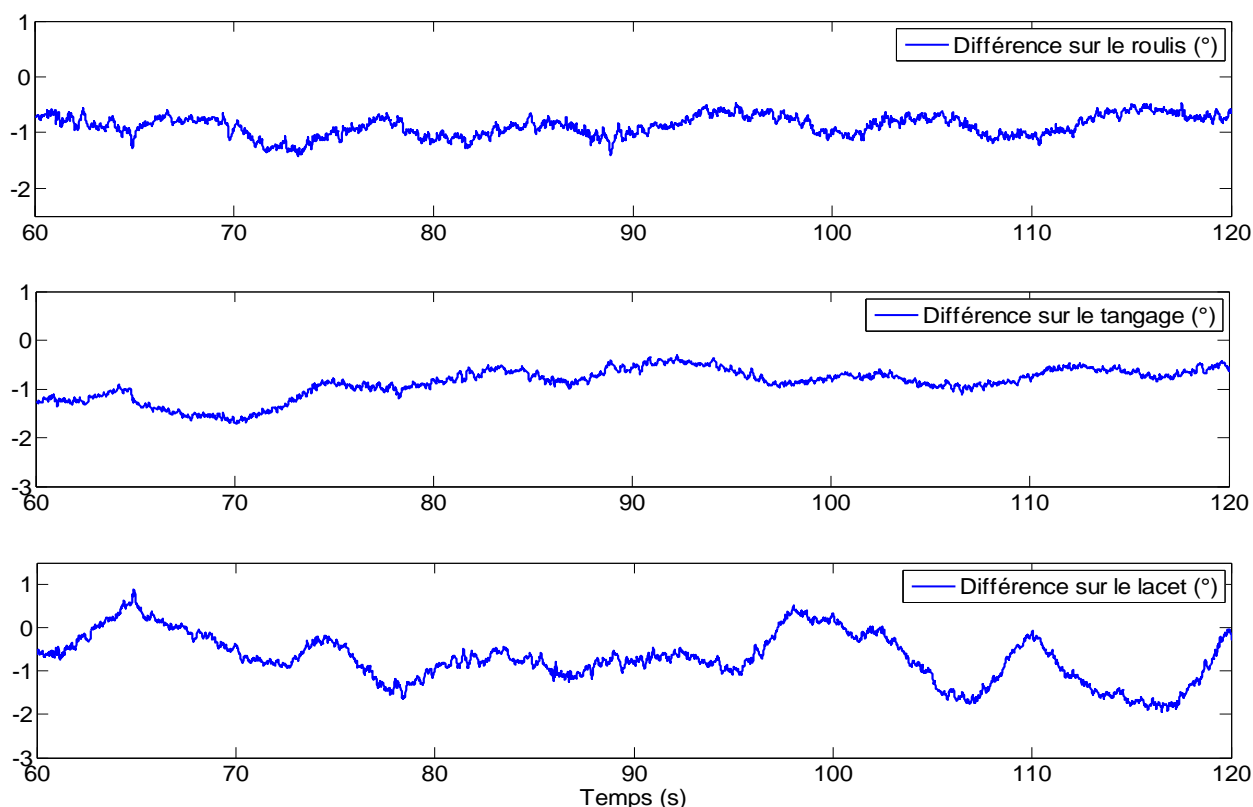


Fig. 4.7. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G* lors d'une phase dynamique

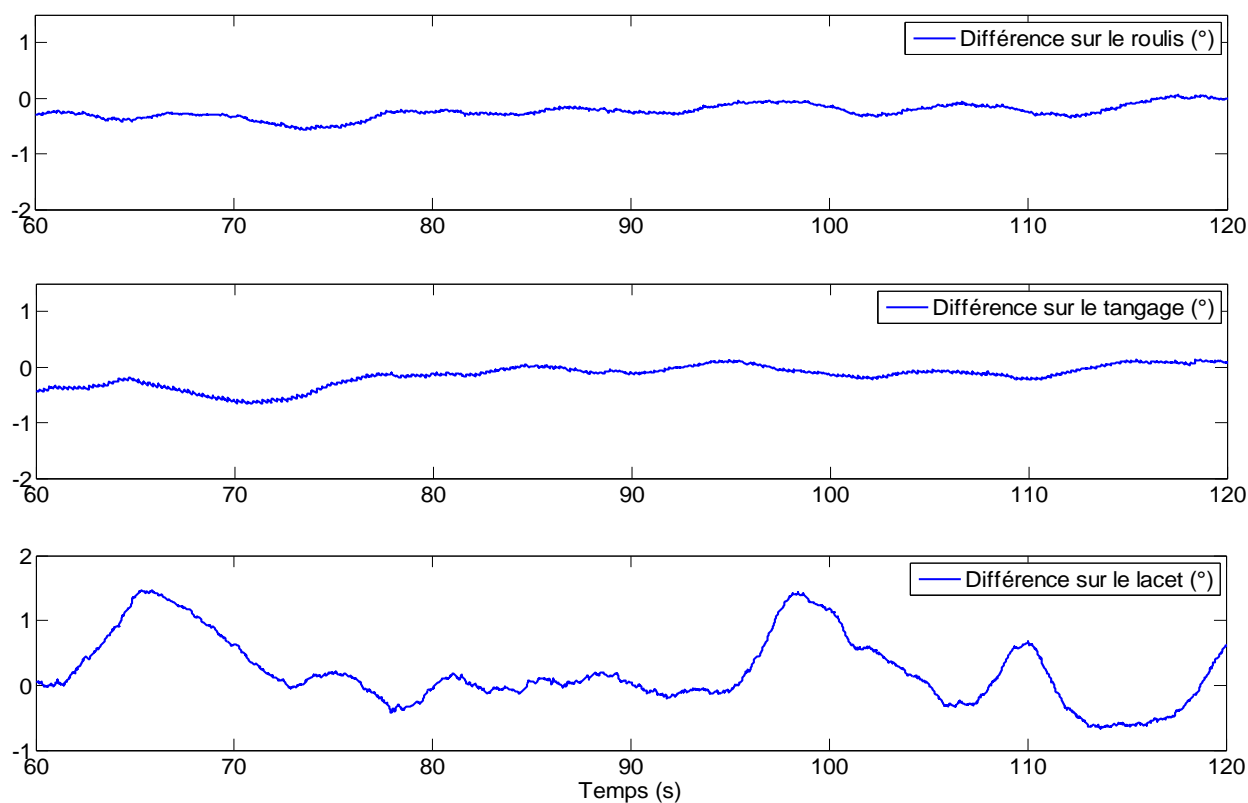


Fig. 4.8. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G* lors d'une phase dynamique

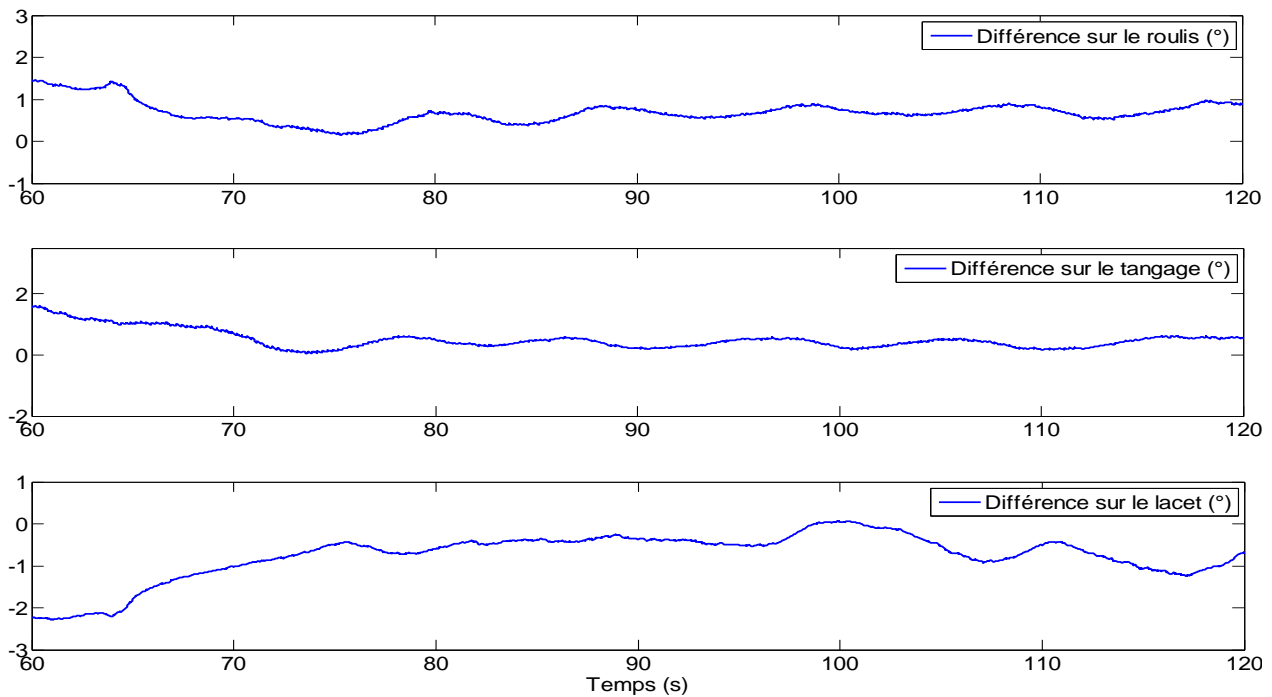


Fig. 4.9. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire et ceux calculés par la *MTi-G* lors d'une phase dynamique

4.4. Mise en œuvre expérimentale lors du mouvement de membre humain

4.4.1. Processus expérimental suivi

Nous avons choisi dans cette partie de tester nos algorithmes d'estimation de l'attitude sur des mouvements d'un membre humain (Fourati *et al.*, 2011a). Nous pensons que la nature du mouvement réalisé pourrait être proche de celui observé lors des déplacements du manchot ou du blaireau. Au cours de cet essai expérimental, la *MTi-G* a été fixée à la main d'un sujet humain à l'aide d'un ruban adhésif comme le montre la figure 4.10. Cette figure montre bien que la *MTi-G* a été attachée de telle façon que les axes de sa triade de capteurs coïncident approximativement avec les axes principaux de la main. Cela nous permet par la suite de représenter les mouvements propres du sujet.

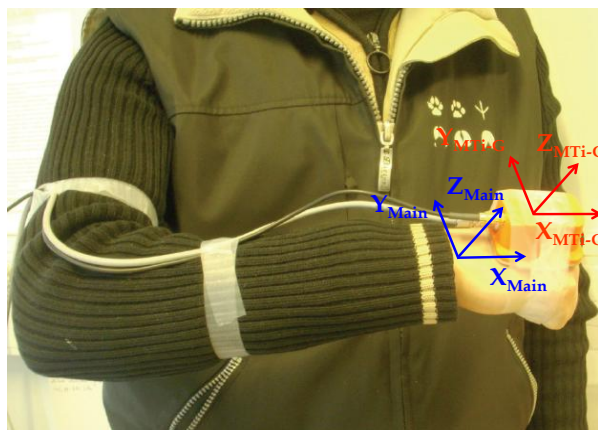


Fig. 4.10. Le sujet humain portant la centrale inertielle *MTi-G* à la main

Afin d'examiner la performance de chaque méthode, nous avons choisi d'effectuer avec la main plusieurs mouvements ayant un profil d'accélération varié dans le but de couvrir la plupart des dynamiques lentes et rapides. Plus précisément, il a été demandé au sujet d'effectuer les trois exercices suivants décrits dans la figure 4.11 :

1. Rotation de l'épaule dans le sens horaire et dans le sens contraire.
2. Extension du coude.
3. Rotation à droite et à gauche autour de l'axe défini le long de la ligne en pointillée de l'avant-bras.

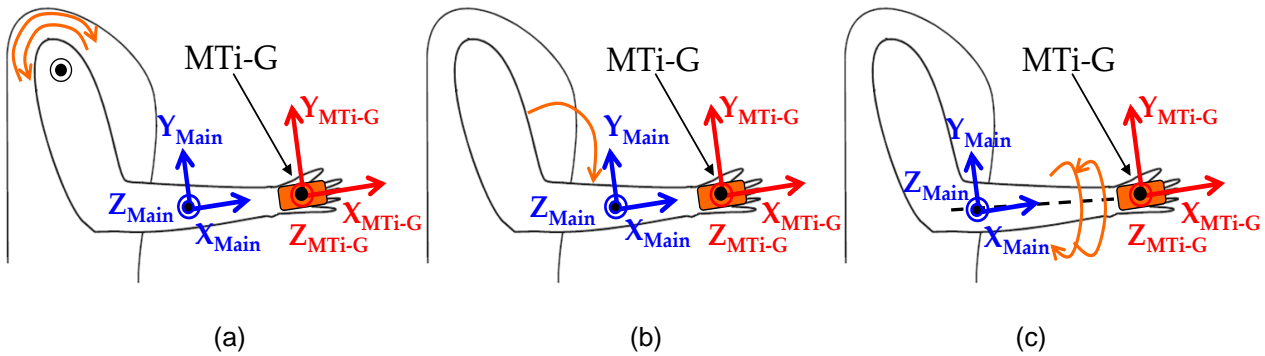


Fig. 4.11. Exercices effectués par le sujet humain - (a) rotation de l'épaule dans le sens horaire et dans le sens contraire - (b) extension du coude - (c) rotation à droite et à gauche autour de l'axe défini le long de la ligne en pointillée de l'avant-bras

Notons que nous avons procédé à plusieurs essais de ces trois exercices et que les résultats d'estimation obtenus étaient très similaires. Nous avons choisi donc de représenter par la suite uniquement un seul exemple illustratif. Nous montrons dans la figure 4.12 l'évolution des différentes mesures de vitesse angulaire, d'accélération et de champ magnétique enregistrées par la *MTi-G* au cours des mouvements effectués. Nous remarquons que l'amplitude du mouvement est suffisamment complète et vaste pour évaluer les techniques d'estimation de l'attitude proposées.

4.4.2. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus

Dans un souci de clarté et pour éviter la surcharge du chapitre, nous avons choisi de représenter dans ce paragraphe uniquement les résultats d'estimation de l'attitude obtenus à partir du filtre complémentaire (3.36). Cependant, les résultats issus des deux autres méthodes (observateur non linéaire additif et celui à modes glissants) sont regroupés en annexe D.2.

Les évolutions temporelles des quaternions calculés par le XKF de la *MTi-G* et par le filtre complémentaire au cours du mouvement réalisé sont tracées dans la figure 4.13. Nous pouvons observer ainsi la similarité entre les deux courbes pour les différentes dynamiques du mouvement de la main. De même, nous remarquons que le taux de convergence du filtre est rapide (environ 2 sec). La différence entre ces deux quaternions

est montrée dans la figure 4.14 dans le but d'évaluer l'erreur commise par le filtre complémentaire.

Cette figure témoigne de l'aptitude de cette approche à estimer le mouvement réalisé par la main (celui de la *MTi-G*) avec une marge d'erreur faible et prouve que les performances d'estimation sont peu sensibles à l'effet des accélérations propres observées au cours des situations dynamiques (par exemple entre [60 ; 80 sec] pour f_x , [80 ; 90 sec] pour f_y et [10 ; 20 sec] pour f_z).

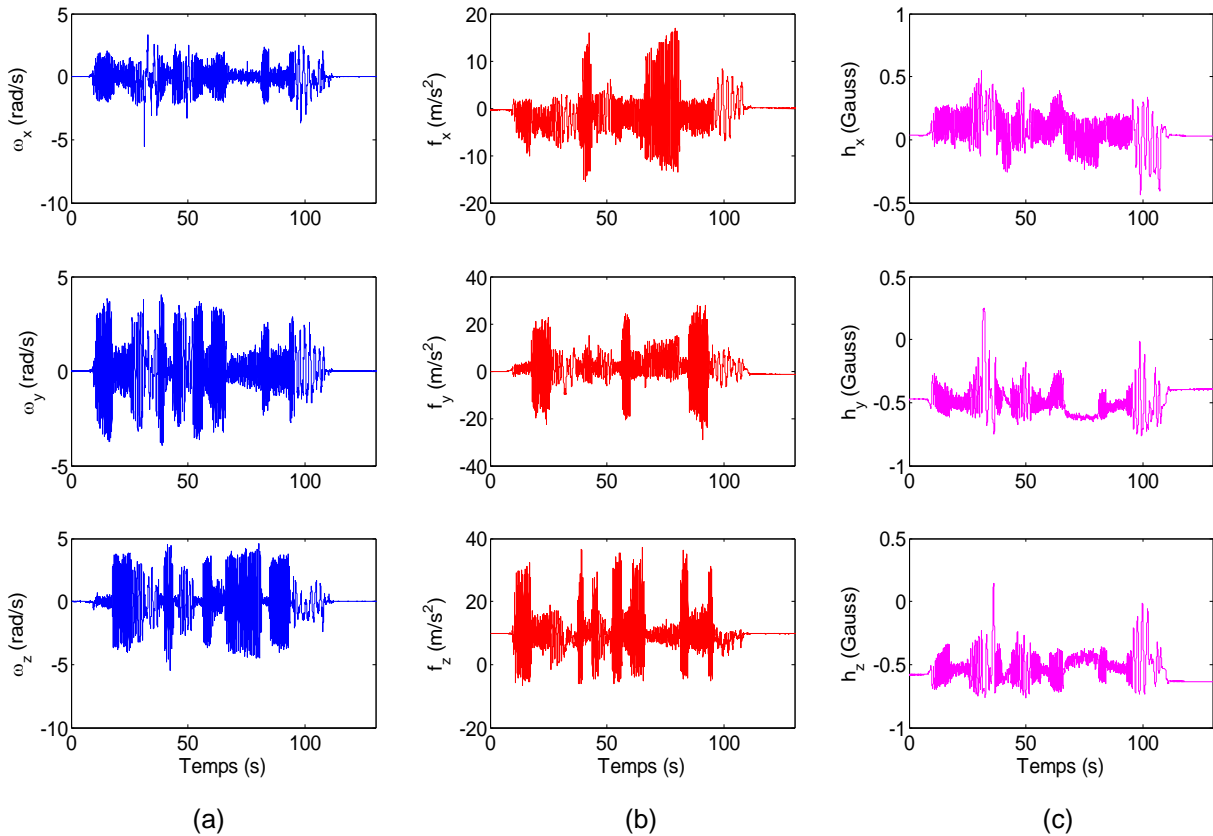


Fig. 4.12. Mesures réelles issues des capteurs au cours du mouvement de la main - (a) vitesse angulaire - (b) accélération totale - (c) champ magnétique terrestre

Dans un souci de clarté des résultats d'estimation de l'attitude, nous avons représenté également les résultats obtenus sous forme d'angles d'Euler en utilisant les équations de passage données en annexe D.1. La figure 4.15 décrit les variations de ces angles estimés par le filtre complémentaire ainsi que par la *MTi-G*. Nous traçons aussi dans la figure 4.16 la différence entre les deux courbes de la figure 4.15. Cette différence nous renseigne sur la marge d'erreur commise lors de l'estimation des angles d'Euler.

Ces deux figures confirment les résultats déjà obtenus lors de l'estimation des quaternions. Ces erreurs ne dépassent pas 3° au niveau du roulis et tangage et 4° pour le lacet. Cela illustre finalement la performance du filtre complémentaire à reconstruire l'orientation de la main lors des différents mouvements effectués et pour toutes les dynamiques lentes et rapides.

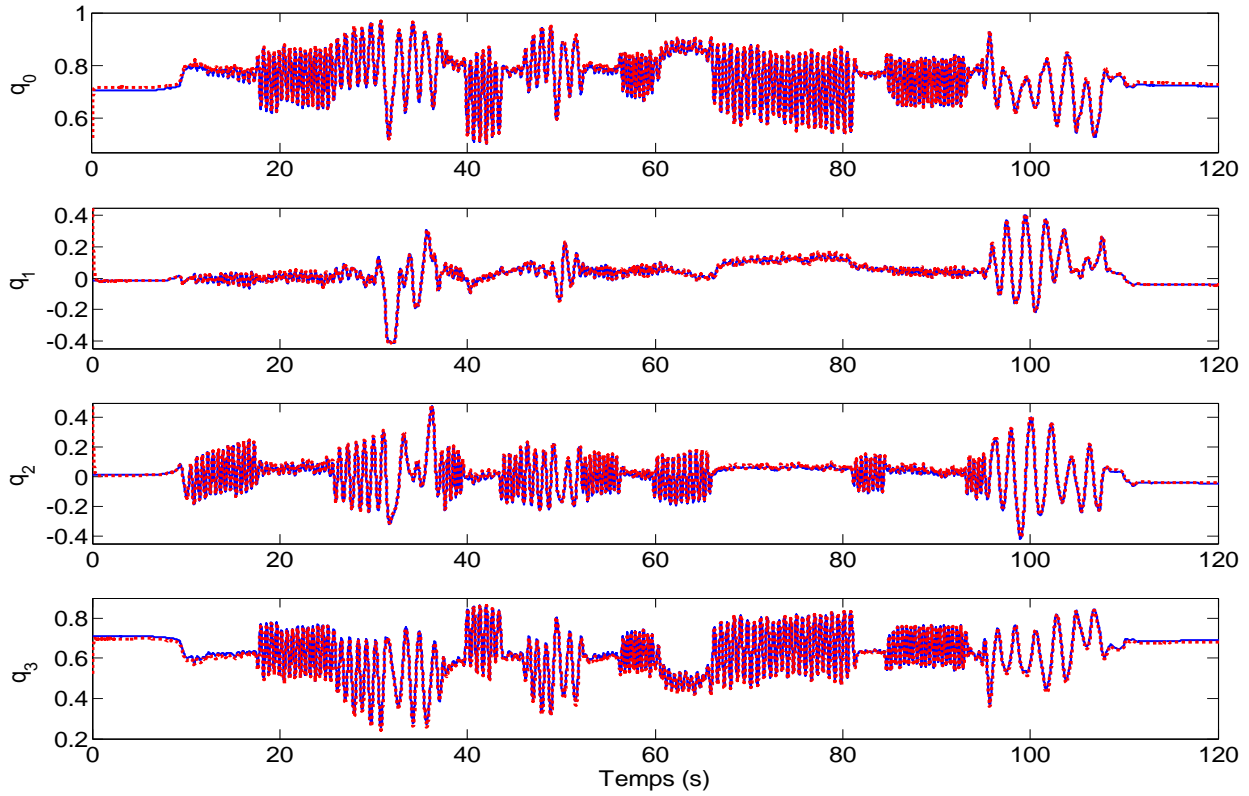


Fig. 4.13. Estimation des composantes du quaternion d'attitude au cours du mouvement réalisé par la main : q (quaternion calculé par la MTi-G (—)), \hat{q} (quaternion estimé par le filtre complémentaire (- -))

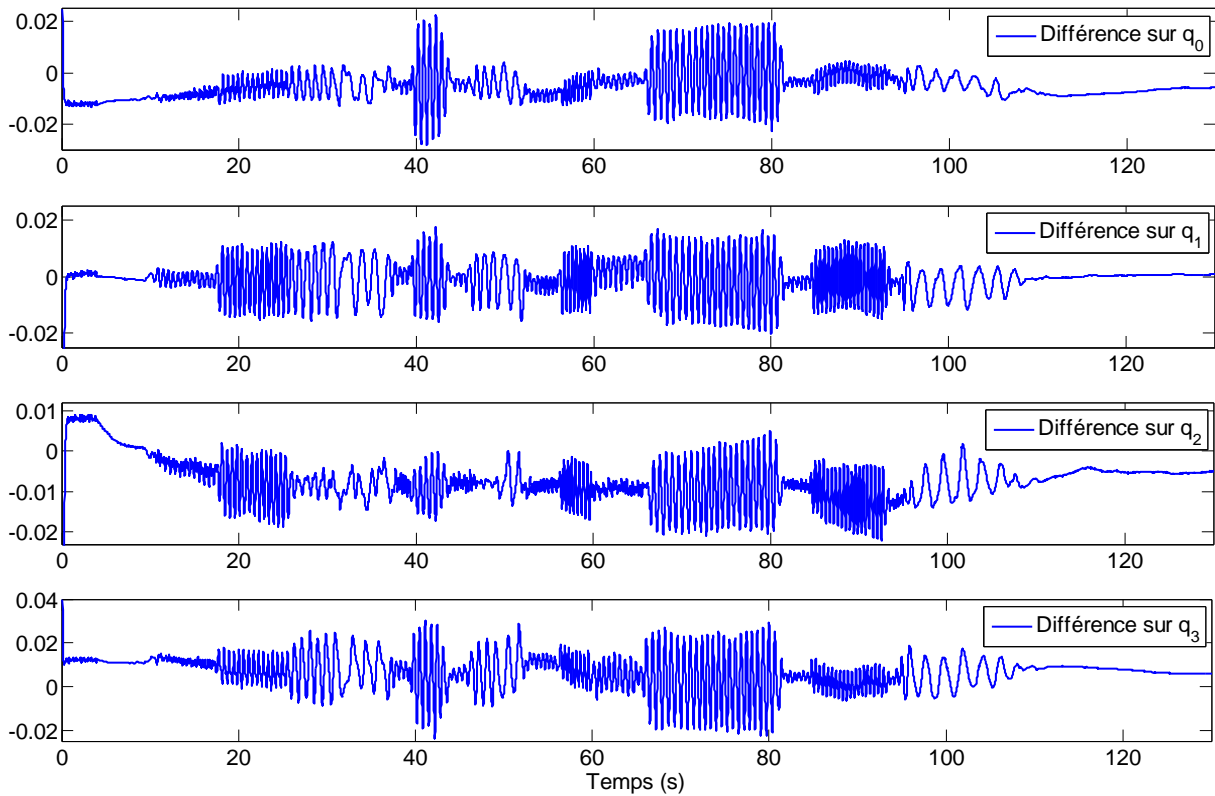


Fig. 4.14. Evolution temporelle de la différence entre le quaternion estimé par le filtre complémentaire et celui calculé par la MTi-G au cours du mouvement réalisé par la main

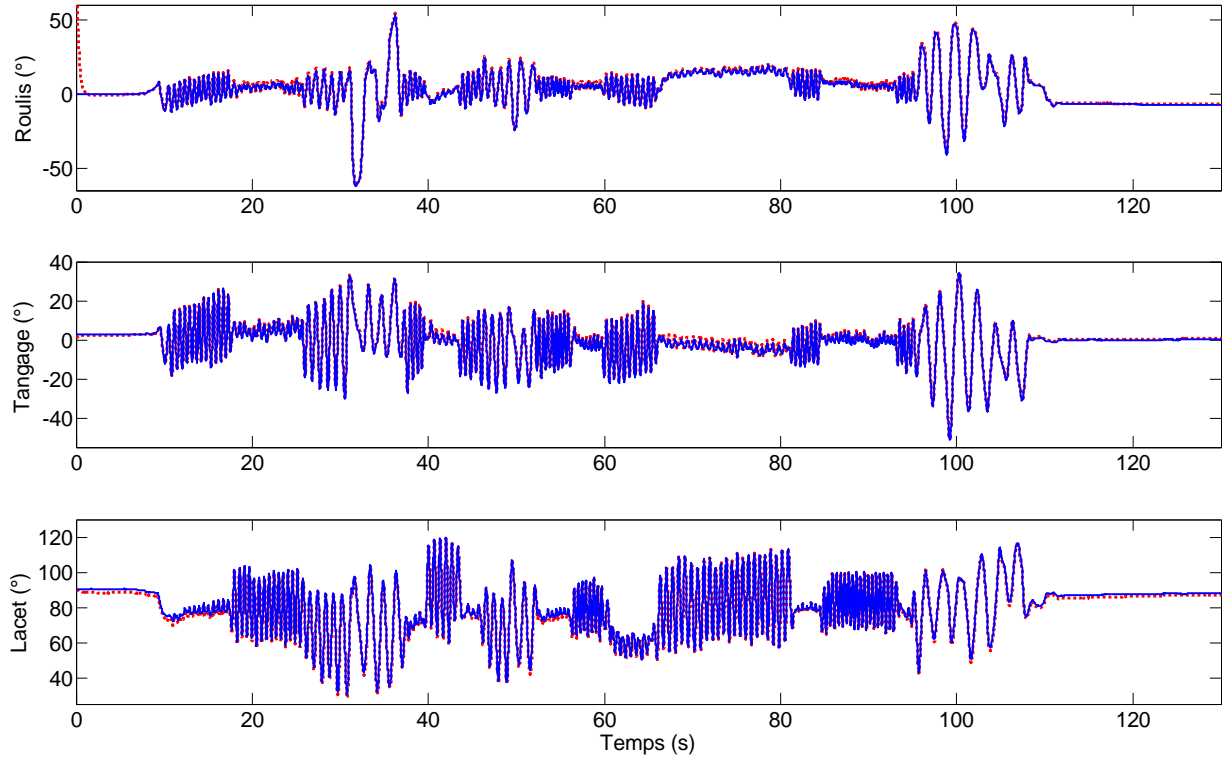


Fig. 4.15. Estimation des angles d'Euler au cours du mouvement réalisé par la main : (φ, θ, ψ) : angles d'Euler calculés par la MTi-G (—), $(\hat{\varphi}, \hat{\theta}, \hat{\psi})$: angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire (- -)

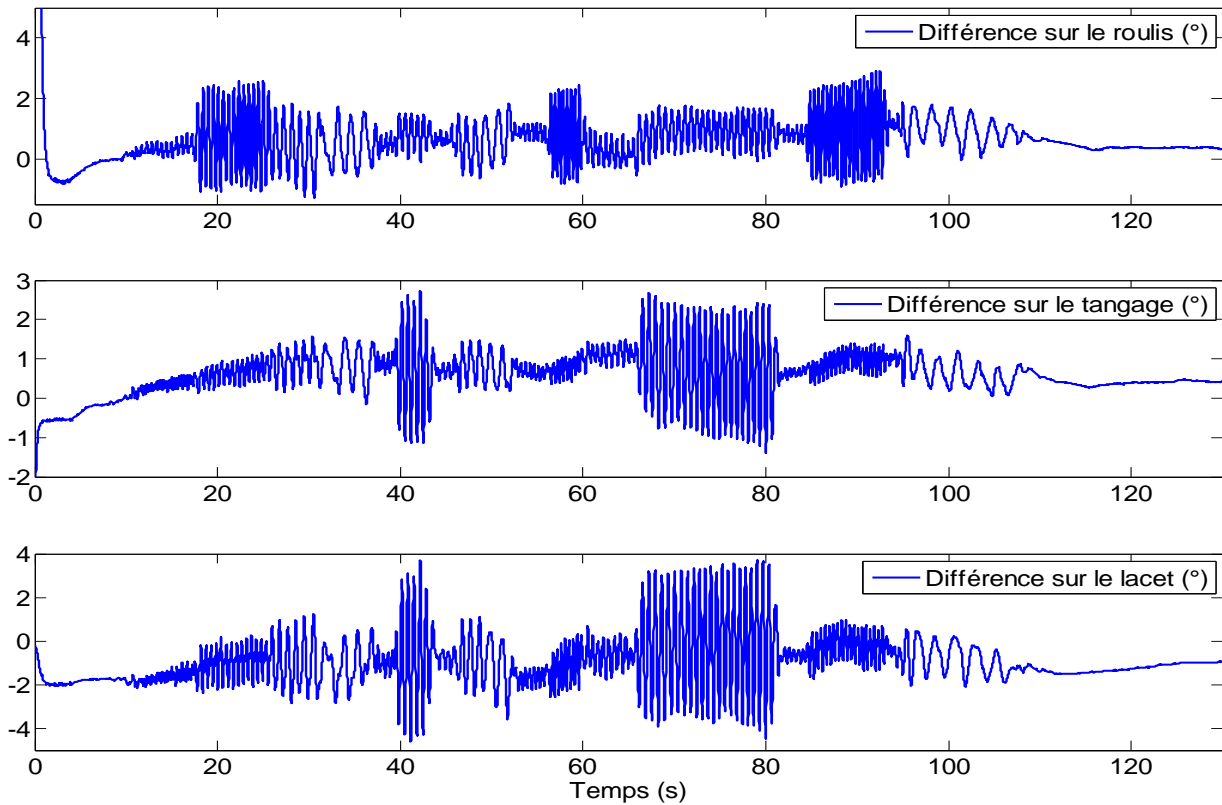


Fig. 4.16. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire et ceux calculés par la MTi-G au cours du mouvement réalisé par la main

4.5. Mise en œuvre expérimentale lors du mouvement d'un animal

L'application des algorithmes proposés sur nos modèles biologiques d'étude n'a pas pu être réalisée à ce stade du projet puisque le prototype dédié à cette application n'est pas encore fonctionnel. A cela s'ajoute les problèmes trouvés pour effectuer les essais expérimentaux avec la *MTi-G* sur le manchot à cause de l'éloignement de son environnement de vie (l'Antarctique) et la difficulté de capture dans le cas du blaireau. Par conséquent, nous nous sommes intéressés à d'autres animaux sur lesquels il est plus facile d'attacher la *MTi-G* pour évaluer les performances de nos approches de reconstitution de l'attitude. Nous consacrons cette partie à la présentation des résultats expérimentaux obtenus plutôt lors des mouvements de chien et de cheval. Bien que nous ayons déjà validé les performances de nos approches sur un humain, ses mouvements réalisés suivent un protocole défini et restent bien choisis. Le choix du passage dans le cas de l'animal est expliqué par les deux points suivants : (1) absence de contrôle volontaire du mouvement de l'animal (accélération propre rapide est imprévisible), (2) nous pensons que le style de mouvements sur le chien et le cheval est probablement semblable à celui que nous pourrions observer sur le manchot et le blaireau. Par conséquent, si les résultats obtenus sont satisfaisants, il serait plus facile de les transposer par la suite dans le cas réel de l'application finale.

Les résultats d'estimation de l'attitude présentés dans cette partie sont uniquement issus du filtre complémentaire (3.36). Cependant, les résultats obtenus à partir des deux autres méthodes (observateur non linéaire additif et celui à modes glissants) sont regroupés en annexe D.3.

4.5.1. Essai expérimental de reconstitution de l'attitude d'un chien

L'essai expérimental réalisé vise à reconstruire la variation de l'attitude du corps d'un chien au cours de son mouvement (Fourati *et al.*, 2009d).

4.5.1.1. Processus expérimental suivi

Lors de cet essai, nous avons choisi d'attacher la centrale inertielle *MTi-G* au dos d'un chien tout en faisant attention à ce que les trois axes de cette unité soient alignés avec les axes principaux de son corps (Figure 4.17). La trajectoire suivie par ce dernier a été effectuée dans un terrain de football comme le montre la figure 4.18.

Les mesures d'accélération, de champ magnétique et de vitesse angulaire montrées dans la figure 4.19 sont enregistrées par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le chien. Il convient de noter qu'à partir des mesures enregistrées par l'accéléromètre, nous remarquons que le mouvement de l'animal est constitué de deux profils d'accélération, un correspondant aux basses fréquences du mouvement (lors de la phase du pas) et l'autre plutôt pour les hautes fréquences (lors de la phase du trot et du galop). Ce profil d'accélération enregistré varie entre $[-15 ; +15 \text{ m/s}^2]$ pour f_x et f_y et $[-5 ; +25 \text{ m/s}^2]$ pour f_z . L'augmentation du niveau d'accélération entre les deux phases de mouvement est due

aux accélérations propres du chien qui sont plus importantes lors de la phase du trot et du galop.



Fig. 4.17. La centrale inertielle *MTi-G* attachée au dos du chien



Fig. 4.18. Description schématique de la trajectoire suivie par le chien

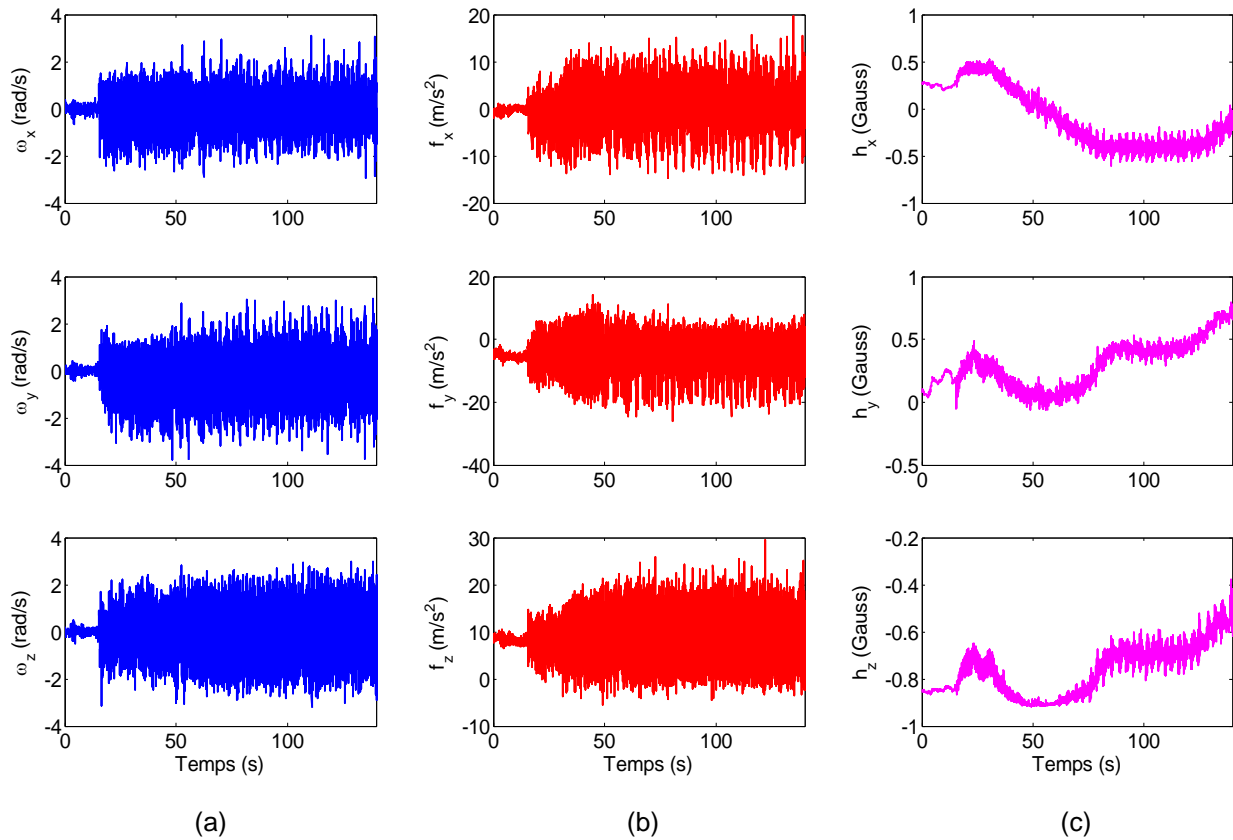


Fig. 4.19. Mesures réelles issues des capteurs de la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le chien - (a) vitesse angulaire - (b) accélération totale - (c) champ magnétique terrestre

4.5.1.2. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus

La figure 4.20 illustre l'évolution des quatre composantes du quaternion décrivant le mouvement du chien. Pour chaque composante, nous présentons deux courbes : la première correspond au quaternion estimé par le filtre complémentaire et la deuxième correspond à celui calculé par la *MTi-G*.

Afin d'examiner de près la précision de notre approche, nous traçons dans la figure 4.21 l'erreur d'estimation du quaternion en ayant recours à une différence entre le quaternion estimé par le filtre complémentaire et le quaternion calculé par la *MTi-G*. Il est clair à partir de cette figure que la différence est moyennement faible tout le long de l'essai réalisé. Nous remarquons aussi que notre approche est peu sensible à l'effet de l'accélération propre de l'animal surtout au cours de la phase de trot et de galop.

Nous présentons aussi les résultats d'estimation de l'attitude du même mouvement sous forme d'angles d'Euler en utilisant les formules de passage détaillées en annexe D.1. La figure 4.22 regroupe les angles d'Euler calculés par le filtre complémentaire et par la *MTi-G* alors que la figure 4.23 illustre l'évolution de l'erreur d'estimation correspondante.

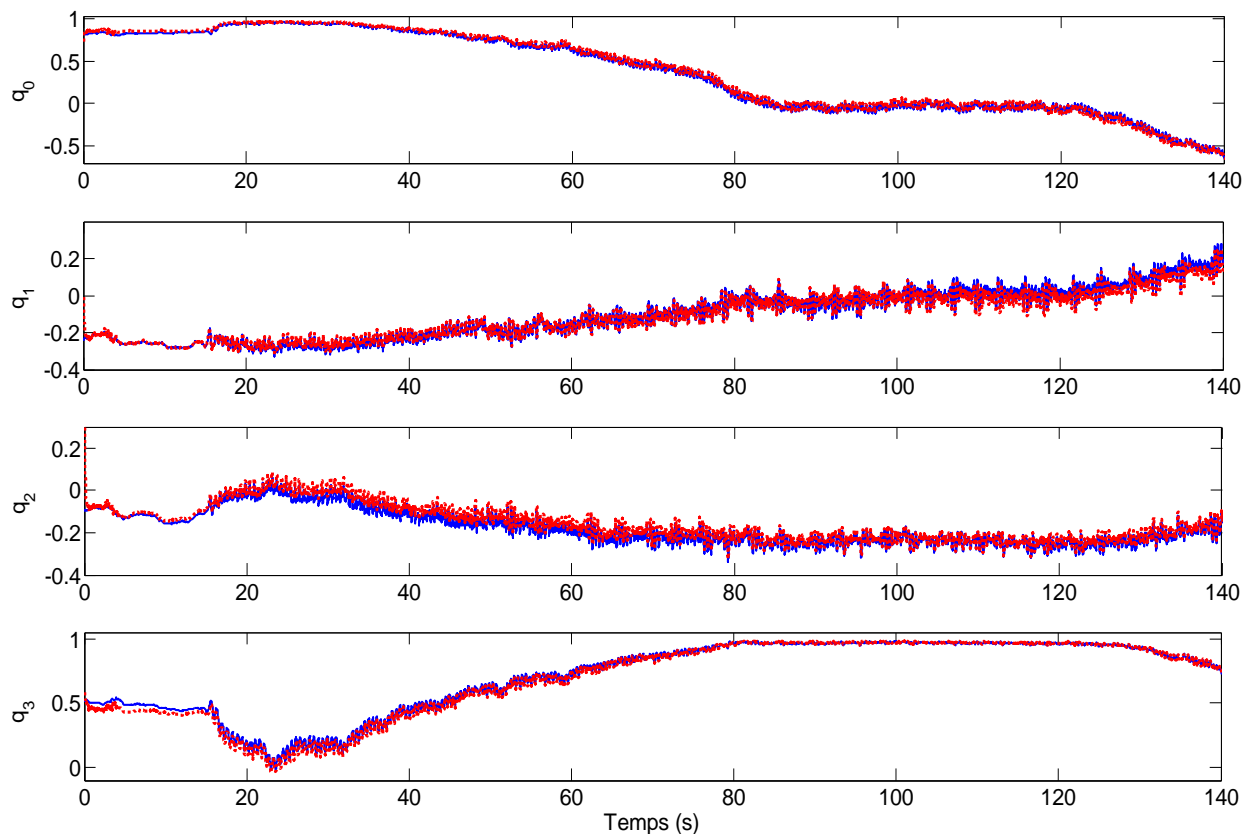


Fig. 4.20. Estimation des composantes du quaternion d'attitude au cours du mouvement réalisé par le chien : q (quaternion calculé par la *MTi-G* en ligne solide (—)), \hat{q} (quaternion estimé par le filtre complémentaire (- -))

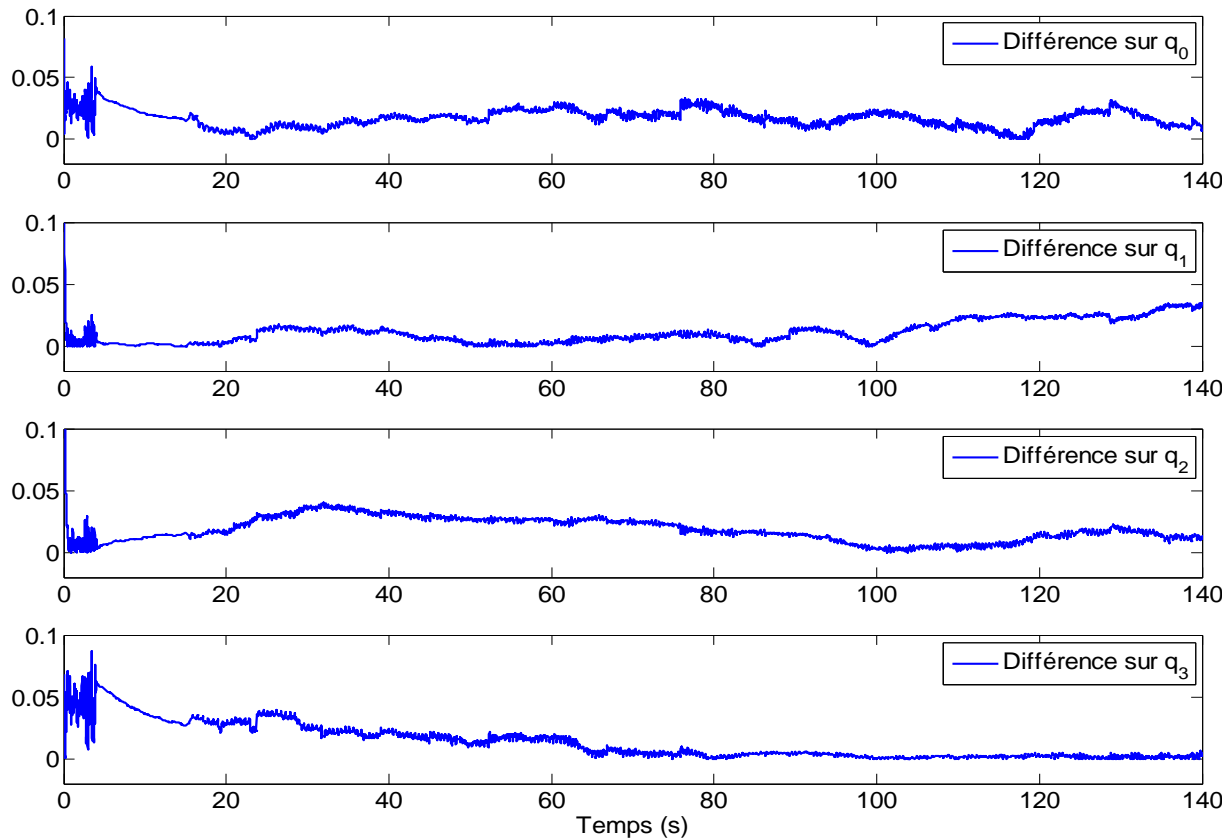


Fig. 4.21. Evolution temporelle de la différence entre le quaternion estimé par le filtre complémentaire et celui calculé par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le chien

A partir de la figure 4.22 nous remarquons que pendant la période $[0 ; 18 \text{ sec}]$, la variation de l'attitude est négligeable puisque le chien est encore au repos (phase quasi-statique). Ensuite, après cette période, nous remarquons une légère variation des angles de roulis et de tangage puisque la *MTi-G* conserve approximativement sa position horizontale sur le dos du chien vu son mouvement effectué sur un plan horizontal. Par contre, nous observons une large variation de l'angle de lacet du fait que l'animal a changé sa direction pour se déplacer et suivre sa trajectoire (Figure 4.18).

Notons que le chien réalise un demi cercle au cours de sa trajectoire, ainsi nous observons une variation de 180° de l'angle de lacet. A partir de la figure 4.23, nous pouvons conclure que le décalage entre l'estimation des angles d'Euler par le filtre complémentaire et par la *MTi-G* reste toujours plus petit que 6° pour les trois angles, même pendant les hautes fréquences du mouvement de l'animal. Durant les phases quasi-statiques, ce décalage est inférieur à 3° .

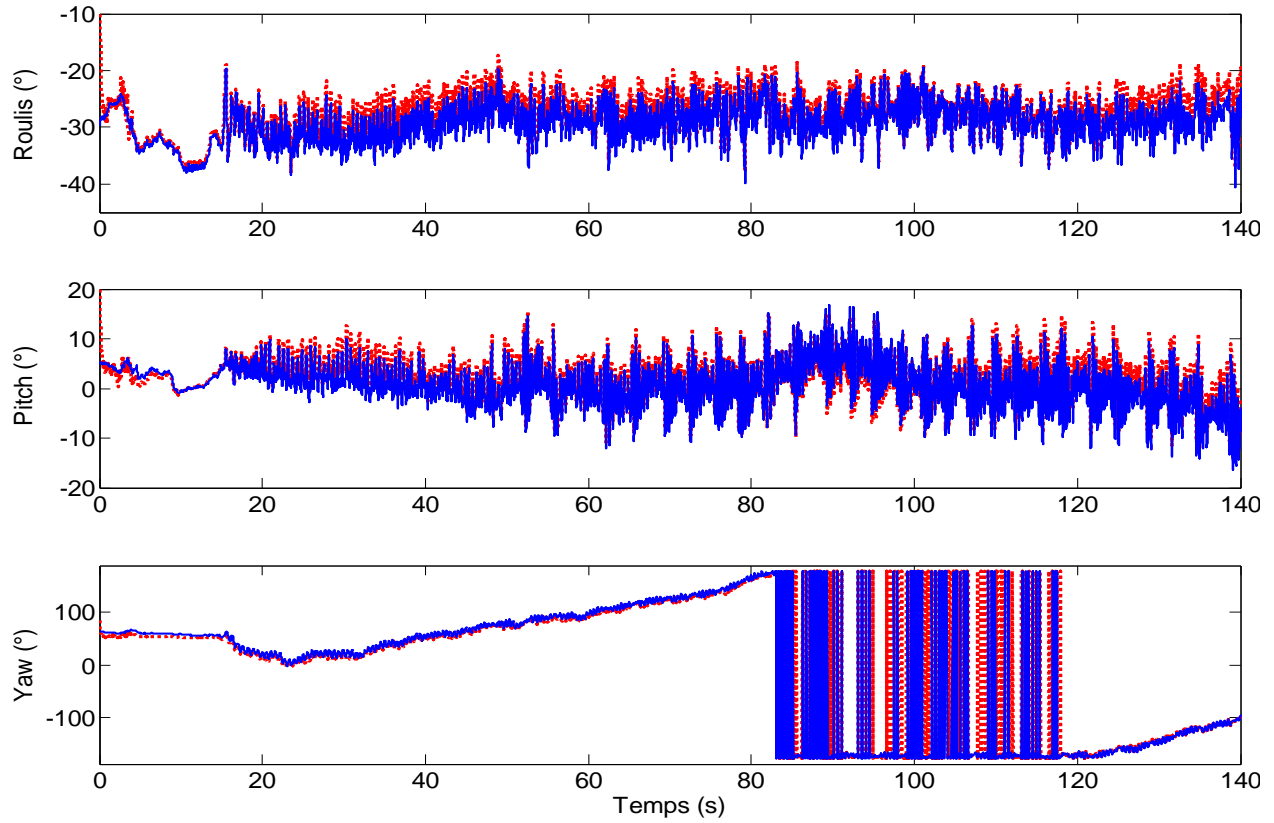


Fig. 4.22. Estimation des angles d'Euler au cours du mouvement réalisé par le chien : (φ, θ, ψ) : angles d'Euler calculés par la MTi-G (—), $(\hat{\varphi}, \hat{\theta}, \hat{\psi})$: angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire (- -)

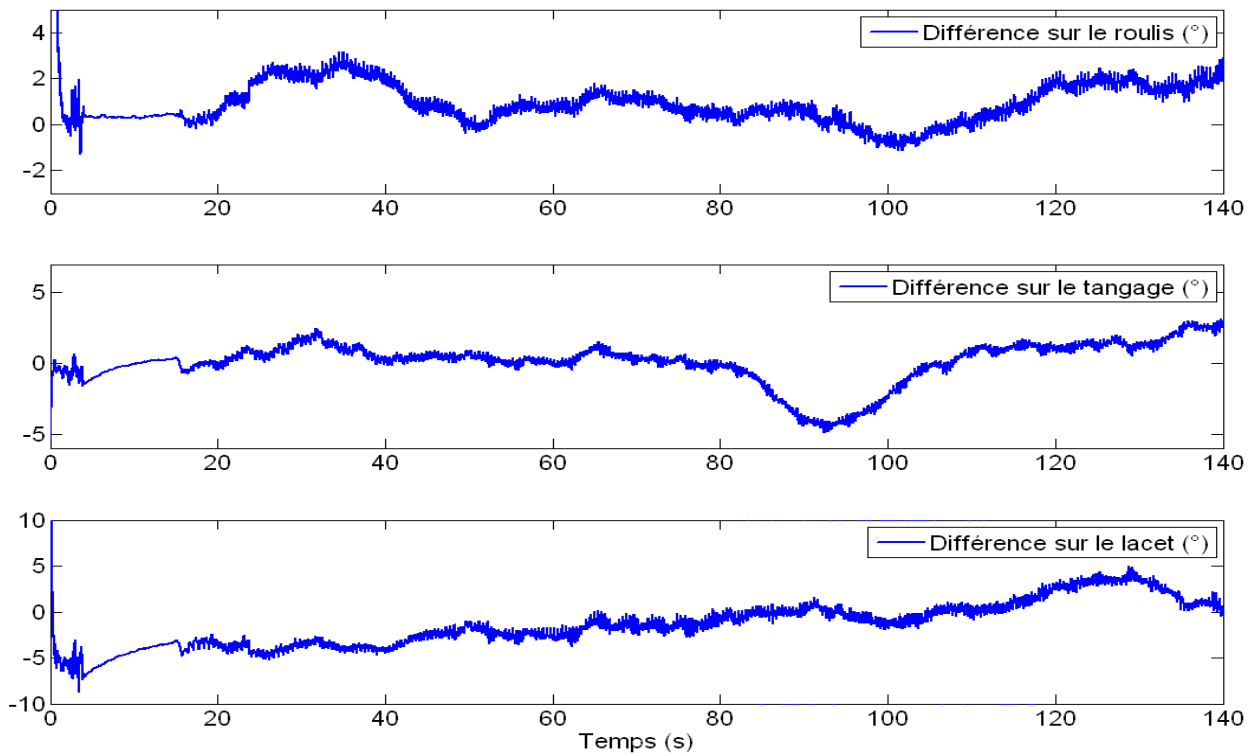


Fig. 4.23. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire et ceux calculés par la MTi-G au cours du mouvement du chien

4.5.2. Essai expérimental de reconstitution de l'attitude d'un cheval

Nous présentons dans cette partie les résultats d'estimation de l'attitude du cheval au cours de ses déplacements (Fourati *et al.*, 2011a). Le choix du cheval nous permet de varier encore plus les gammes d'accélération propres observées au cours du mouvement.

4.5.2.1. Processus expérimental suivi

Les essais réalisés sur le cheval ont été effectués au sein du **CERUC**⁵⁰. La centrale d'attitude *MTi-G* a été attachée à la tête du cheval, comme le montre la figure 4.24. La *MTi-G* est fixée de telle sorte que ses axes s'alignent approximativement avec ceux de la tête du cheval. Le choix de ce membre du corps du cheval donne par exemple la possibilité aux biologistes d'étudier ses mouvements le long de sa course. Cette information leur permet aussi d'étudier son comportement lors des compétitions de haut niveau. De même, cet essai peut servir comme exemple témoin dans l'application au *Bio-logging*.

La figure 4.25 illustre la trajectoire de course adoptée par le cheval au cours de cet essai. Le style de cette course, composé de plusieurs tours, contient les allures naturelles de mouvements chez le cheval comme le pas, le trot, et le galop. Ces trois allures de mouvements sont représentées dans la figure 4.26. En effet, cet essai est entamé par la phase de pas au cours de laquelle le cheval bouge sa tête et son cou légèrement en haut et en bas. Pendant la phase de trot, le cheval fait de petits mouvements de balancement avec sa tête. La course du cheval est terminée par la phase de galop dans laquelle le cheval bouge sa tête rapidement dans toutes les directions. Les mesures d'accélération, de champ magnétique et de vitesse angulaire enregistrées par la *MTi-G* durant la course du cheval sont tracées dans la figure 4.27.

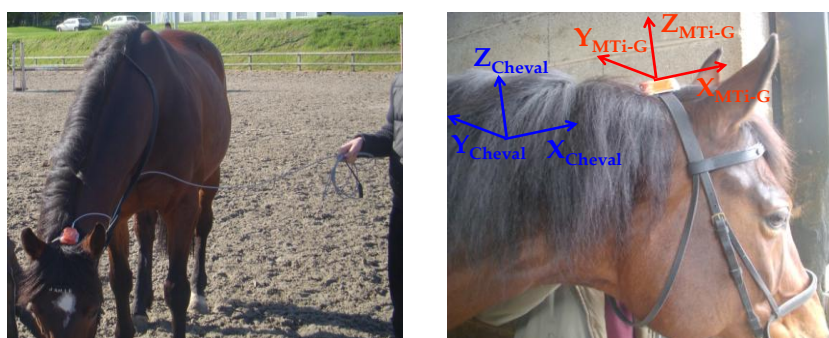


Fig. 4.24. La centrale inertielle *MTi-G* attachée à la tête du cheval

A partir de cette figure, il est possible de différencier sur les mesures de l'accéléromètre les trois phases du mouvement à savoir celle de pas ([0 ; 10 sec]), celle de trot ([0 ; 80 sec]) et celle de galop ([80 ; 140 sec]). Nous remarquons également que le maximum

⁵⁰ **CERUC** : Centre Equestre Reims Université Champagne

d'accélération est enregistré suivant l'axe Z (environ $\pm 30 \text{ m/s}^2$). Cela s'explique par le fait que l'axe Z de la *MTi-G* est dirigé dans le sens vertical, qui est confondu avec celui des mouvements les plus intenses de la tête du cheval (balancements de la tête). De même, nous observons que les vitesses angulaires atteignent leurs maximums au cours de la phase du galop.

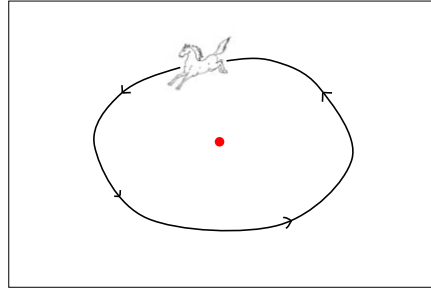


Fig. 4.25. Course effectuée par le cheval

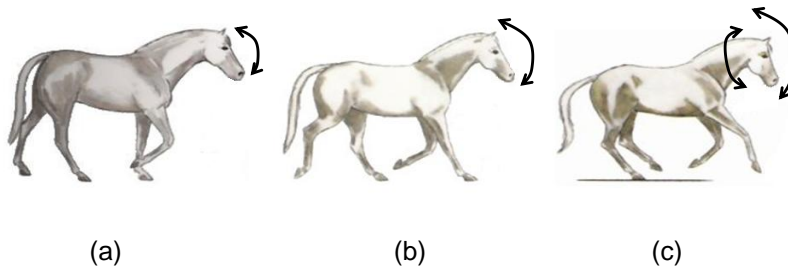


Fig. 4.26. Les allures de mouvement du cheval - (a) pas - (b) trot - (c) galop

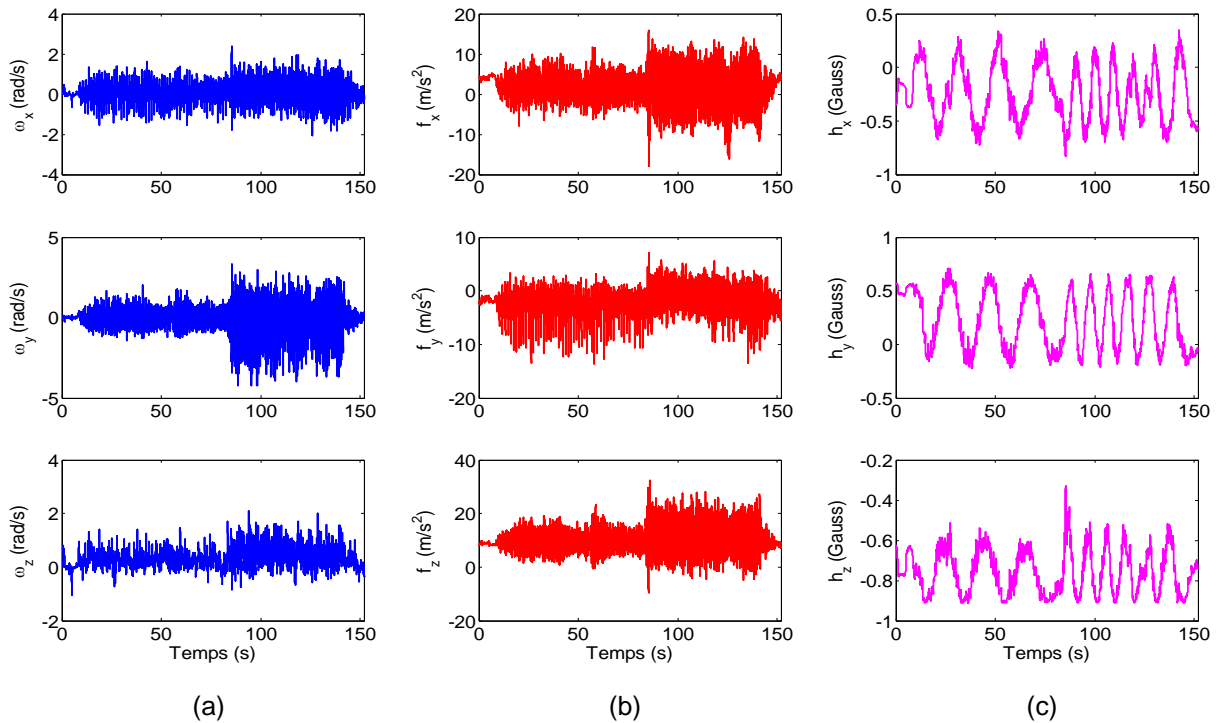


Fig. 4.27. Mesures réelles issues des capteurs de la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le cheval - (a) vitesse angulaire - (b) force spécifique - (c) champ magnétique terrestre

4.5.2.2. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus

La figure 4.28 montre l'évolution temporelle du quaternion décrivant l'attitude de la tête du cheval pendant sa course. Cette figure illustre la variation du quaternion estimé par le filtre complémentaire ainsi que le quaternion calculé par le XEKF de la *MTi-G*. Pour mieux observer la qualité d'estimation de l'attitude, nous avons tracé dans la figure 4.29 l'erreur d'estimation obtenue par la différence entre ces deux quaternions. Cette figure illustre clairement la performance du filtre complémentaire pour l'estimation de l'orientation de la tête du cheval même pendant les situations dynamiques (galop) caractérisées par des accélérations propres importantes.

En utilisant les formules de passage données en annexe D.1, nous présentons dans la figure 4.30 la variation de l'attitude plutôt sous forme d'angles d'Euler pour le même mouvement de la tête du cheval. Ces angles, représentés par le roulis, le tangage et le lacet, sont calculés par le filtre complémentaire et l'algorithme interne de la *MTi-G*. La différence entre les angles calculés par ces deux approches est tracée dans la figure 4.31, ce qui nous permet de donner un aperçu général de la performance globale du filtre complémentaire. Nous remarquons bien que cette différence est comprise entre $[-3 ; 3^\circ]$ pour les angles de roulis et tangage et $[0 ; 5^\circ]$ pour l'angle de lacet. Ces performances sont maintenues même pendant les phases de mouvement rapide de l'animal. Au cours des phases statiques et quasi-statiques (phase de pas par exemple), cette différence est inférieure à 2° pour les trois angles d'Euler.

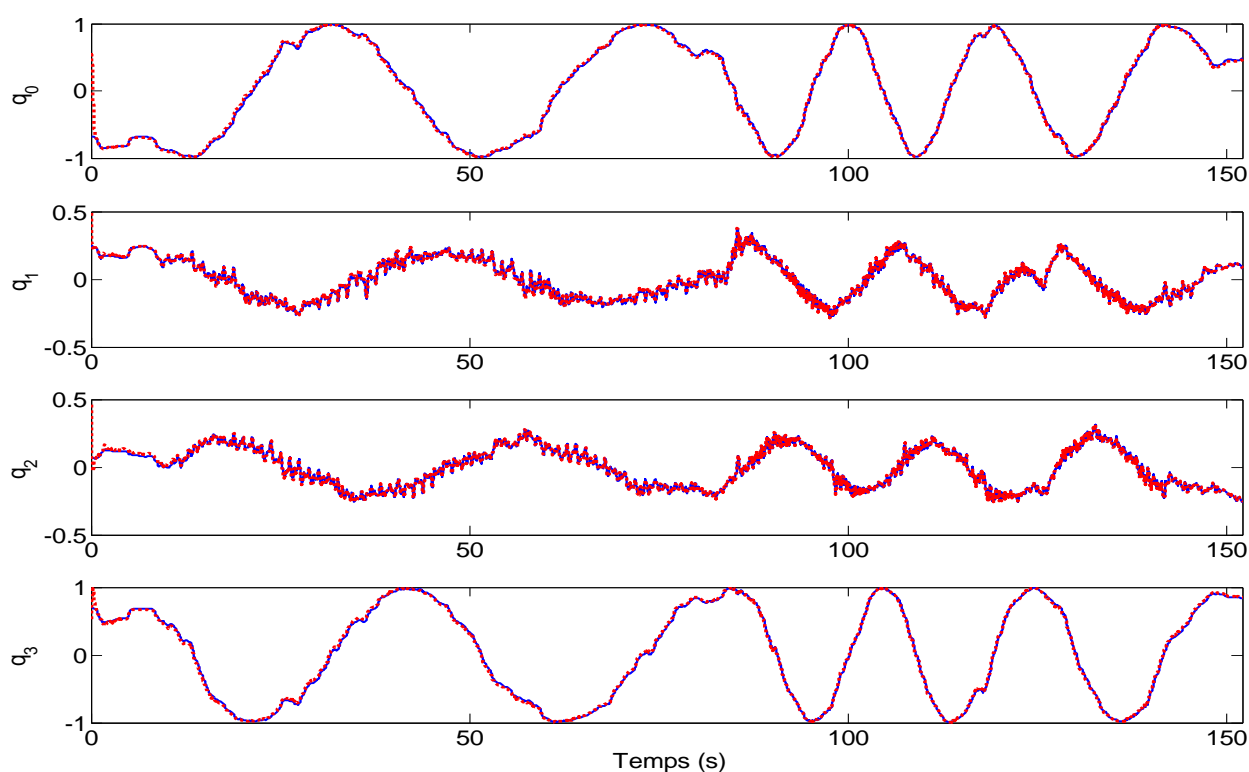


Fig. 4.28. Estimation des composantes du quaternion d'attitude au cours du mouvement réalisé par le cheval : q (quaternion calculé par la *MTi-G* (—)), \hat{q} (quaternion estimé par le filtre complémentaire (- -))

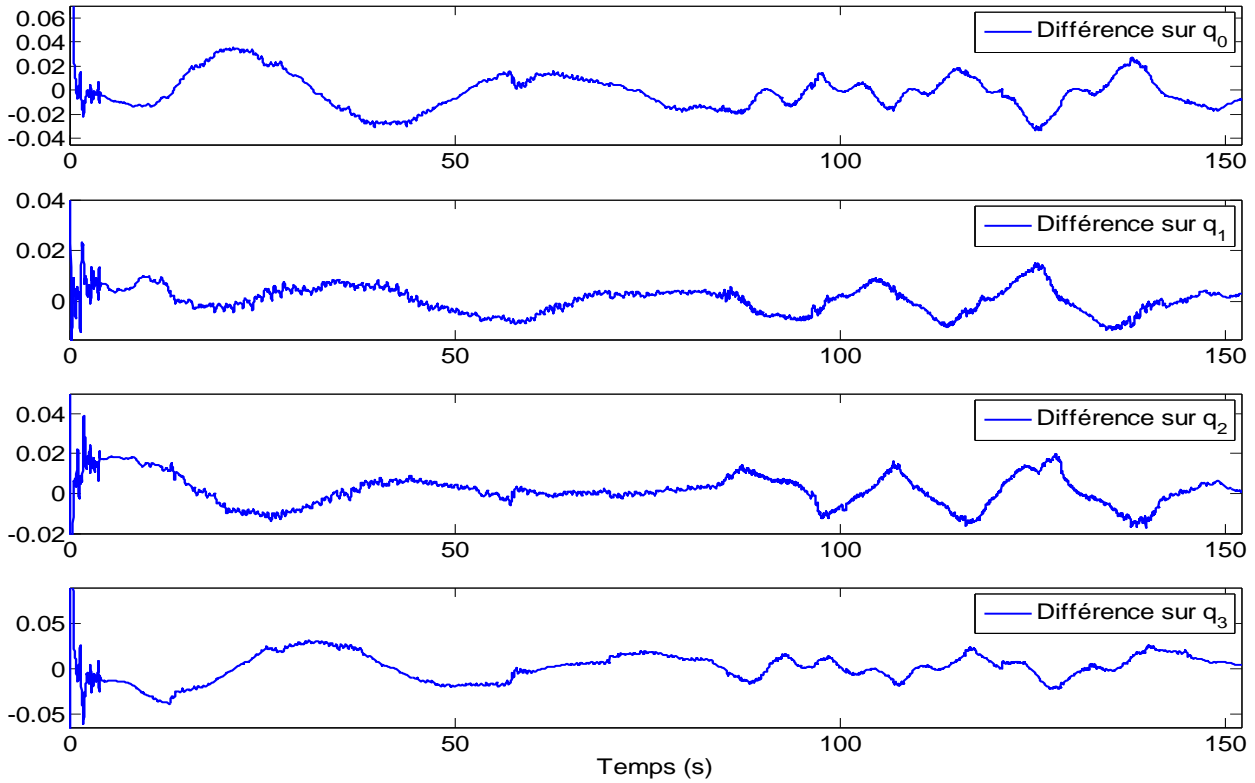


Fig. 4.29. Evolution temporelle de la différence entre le quaternion estimé par le filtre complémentaire et celui calculé par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le cheval

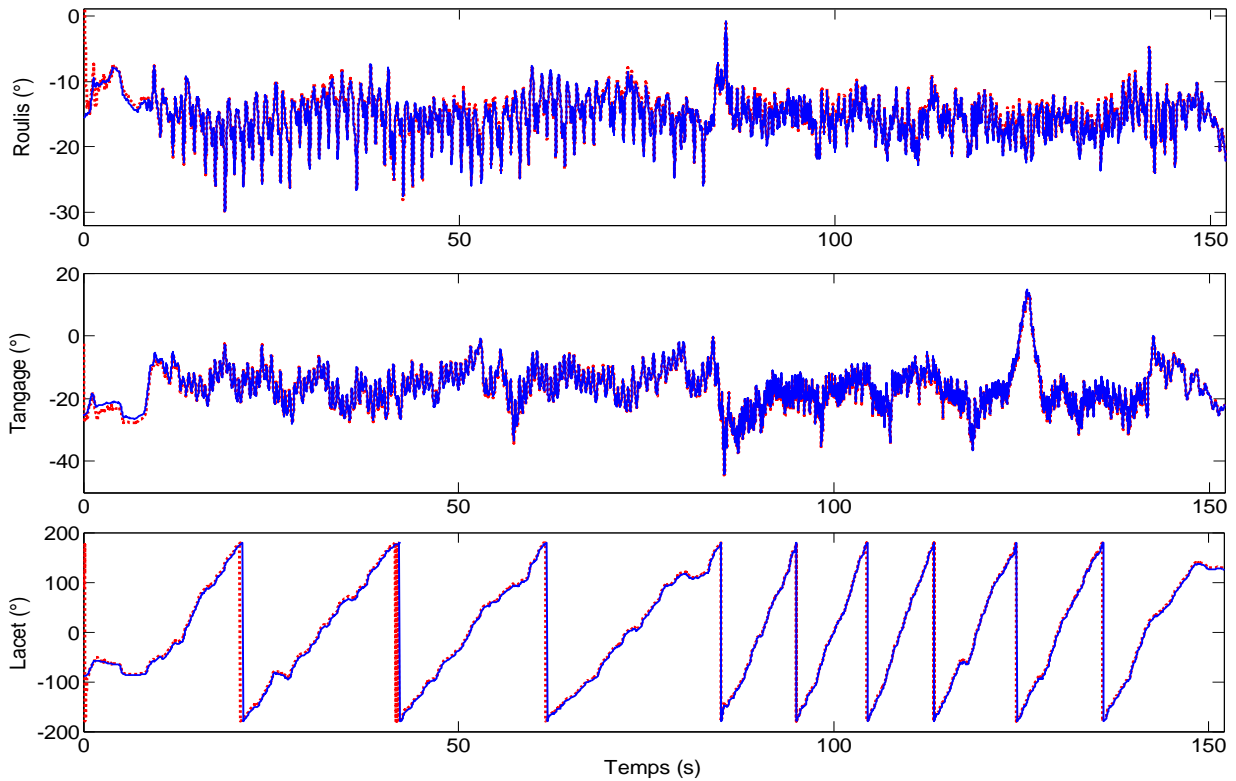


Fig. 4.30. Estimation des angles d'Euler au cours du mouvement réalisé par le cheval : (φ, θ, ψ) : angles d'Euler calculés par la *MTi-G* (—), $(\hat{\varphi}, \hat{\theta}, \hat{\psi})$: angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire (- -)

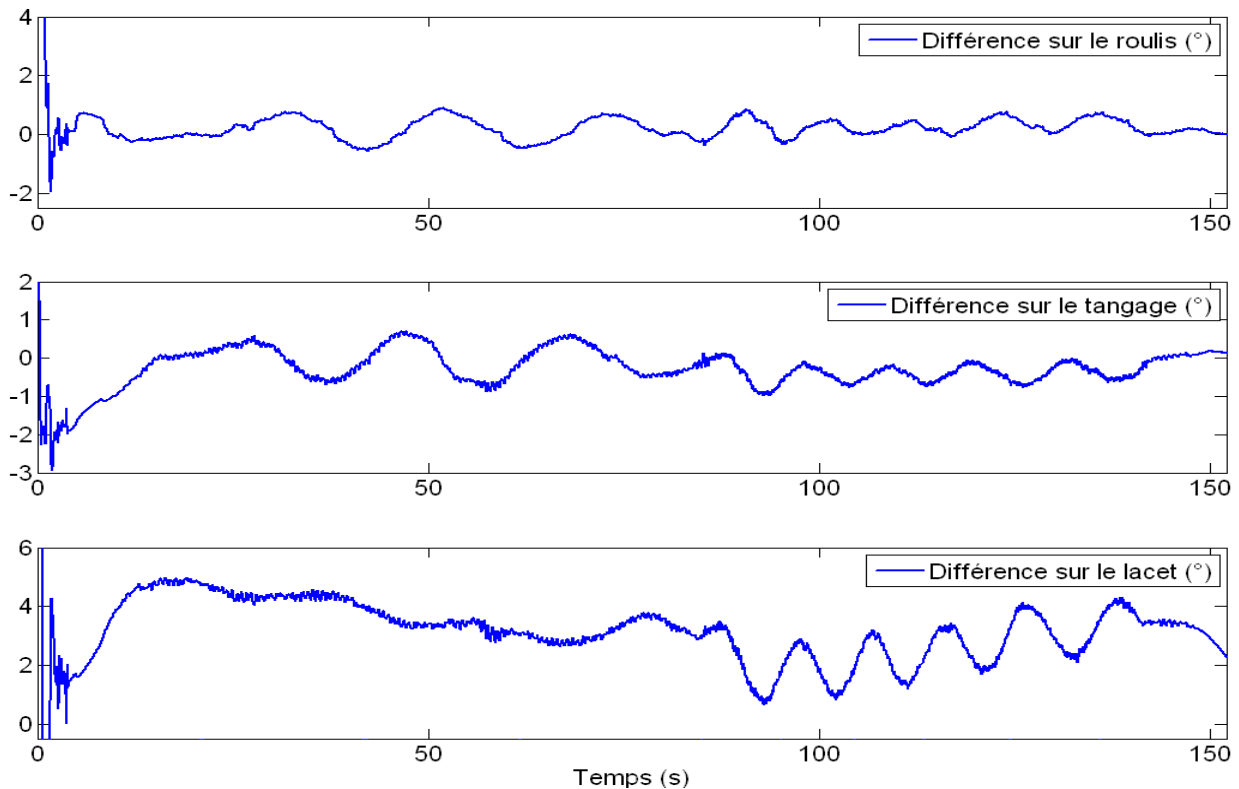


Fig. 4.31. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par le filtre complémentaire et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le cheval

4.6. Analyse et synthèse des performances de l'estimation de l'attitude

Nous analysons dans cette partie les performances d'estimation de l'attitude du filtre complémentaire en les comparant à d'autres méthodes. Par ailleurs, ce même travail a été effectué dans le cas de l'observateur non linéaire additif et celui à modes glissants. Afin d'alléger ce chapitre, nous avons choisi de représenter uniquement les résultats issus du filtre complémentaire.

Dans un premier temps, la précision d'estimation de ce filtre est comparée à celle de l'algorithme interne de la centrale d'attitude *MTi*, basé sur un filtre de Kalman XKF (Xsens Technologies, 2010). Dans un deuxième temps, nous comparons les performances du filtre complémentaire à celles de deux méthodes développées en *Bio-logging* et présentées dans le chapitre 2 (Wilson *et al.*, 2008 ; Watanabe *et al.*, 2005).

4.6.1. Comparaison des performances avec une centrale d'attitude *MTi*

Au cours de ce premier essai expérimental, nous comparons la précision d'estimation de l'attitude du filtre complémentaire à celle obtenue à partir de l'algorithme XKF de la centrale d'attitude *MTi* (Xsens Technologies, 2010). Pour cela, nous considérons un système complet constitué des deux centrales *MTi* et *MTi-G*. Nous les attachons à une plaque à l'aide d'un ruban adhésif de telle sorte que leurs axes principaux soient alignés (Figure 4.32). Nous rappelons que la *MTi-G* est utilisée ici comme référence. Le sujet, prenant à sa main le système complet, a effectué les 4 mouvements, décrits dans la figure

4.33, tout en faisant varier le profil d'accélération du système complet. Ces mouvements sont décrits comme suit :

1. Déplacer le système le long de l'axe Y_{Plaque} dans un plan horizontal (Figure 4.33 (a)).
2. Déplacer le système le long de l'axe Z_{Plaque} dans un plan vertical (Figure 4.33 (b)).
3. Déplacer le système le long de l'axe X_{Plaque} dans un plan horizontal (Figure 4.33 (c)).
4. Déplacer le système le long des trois axes X_{Plaque} , Y_{Plaque} , Z_{Plaque} aléatoirement (mouvement libre) (Figure 4.33 (d)).

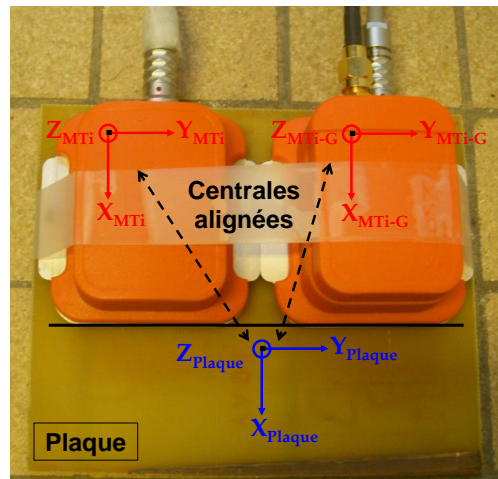


Fig. 4.32. Le système complet constitué des deux centrales *MTi* et *MTi-G* attachées à la plaque avec leurs axes principaux alignés

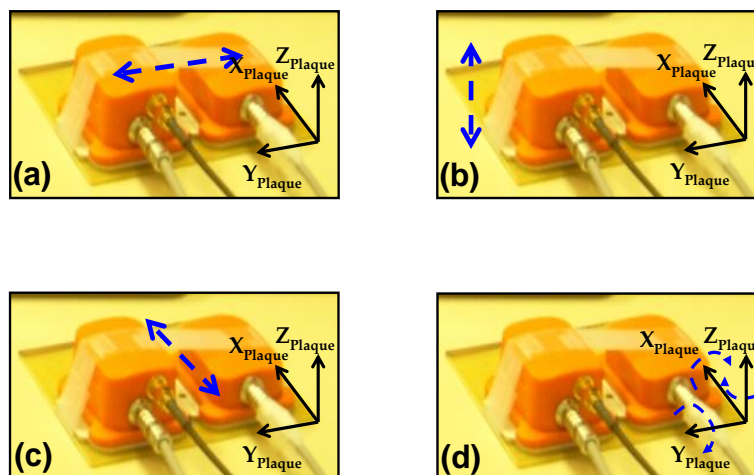


Fig. 4.33. Types de mouvements réalisés durant le test, la flèche discontinue indique la direction du mouvement

A l'instant où nous commençons le test décrit précédemment, les deux centrales sont simultanément mises en marche. Comme elles possèdent la même orientation spatiale et leurs axes principaux sont alignés, elles enregistrent presque les mêmes données inertielles et magnétiques et aux mêmes instants. Ainsi, nous avons choisi d'enregistrer les mesures d'accélération, de champ magnétique et de vitesse angulaire avec la *MTi* au cours des mouvements précédemment décrits. Ces mesures sont représentées dans la

figure 4.34. A partir de cette figure, nous remarquons sur les mesures de l'accéléromètre des phases où l'accélération augmente brusquement à des valeurs proches de $\pm 45 \text{ m/s}^2$.

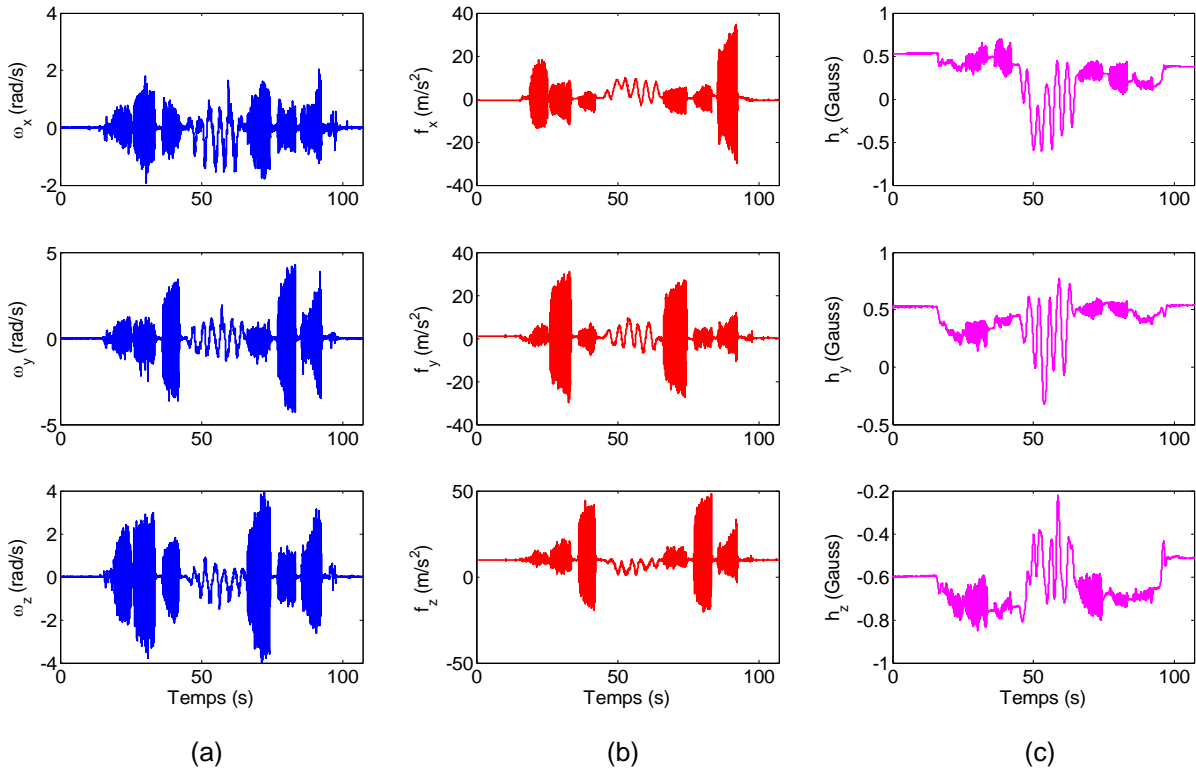


Fig. 4.34. Mesures réelles issues des capteurs de la *MTi* au cours du mouvement du système complet - (a) vitesse angulaire - (b) force spécifique - (c) champ magnétique terrestre

Le filtre complémentaire a été alimenté avec les différentes données enregistrées par la *MTi*. Afin d'être plus concis, nous avons choisi de représenter les résultats de calcul de l'attitude uniquement sous forme d'angles d'Euler en utilisant également les formules de passage données en annexe D.1. La figure 4.35 décrit la variation des angles d'Euler, calculés par la *MTi*, la *MTi-G* et le filtre complémentaire. Nous notons que pendant les intervalles [17 ; 34 sec], [37 ; 42 sec] et [76 ; 95 sec], le mouvement est effectué avec une accélération propre plus élevée.

L'intervalle [76 ; 95 sec] est agrandi dans la figure 4.36 pour bien observer et comparer les trois méthodes. Nous remarquons ainsi une grande similarité entre les résultats de calcul par le filtre complémentaire et la *MTi-G*. Cependant, nous notons une divergence au niveau du calcul de l'attitude par le filtre de kalman de la *MTi*. Ces divergences sont plus apparentes lors des phases où nous appliquons au système complet une accélération propre plus importante, par exemple le cas de la figure 4.36. Par conséquent, ce test illustre bien les performances du filtre complémentaire au cours du mouvement réalisé et montre bien les améliorations que nous avons pu apporter au niveau de l'estimation de l'attitude par rapport au XKF de la *MTi*. De plus, ce test soulève quelques inconvénients du XKF de la *MTi* au niveau de l'estimation de l'attitude surtout pendant les phases à dynamiques rapides.

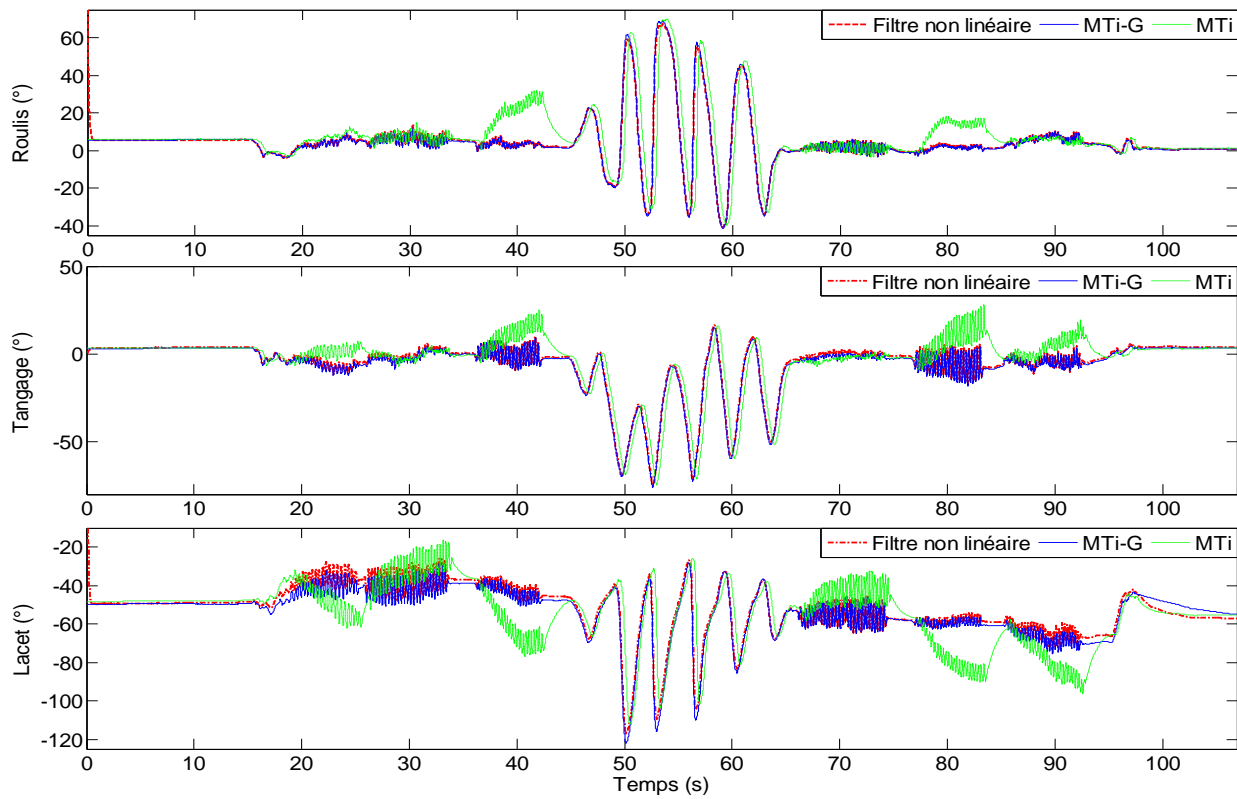


Fig. 4.35. Estimation des angles d'Euler avec le filtre complémentaire, la *MTi* et la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le système complet

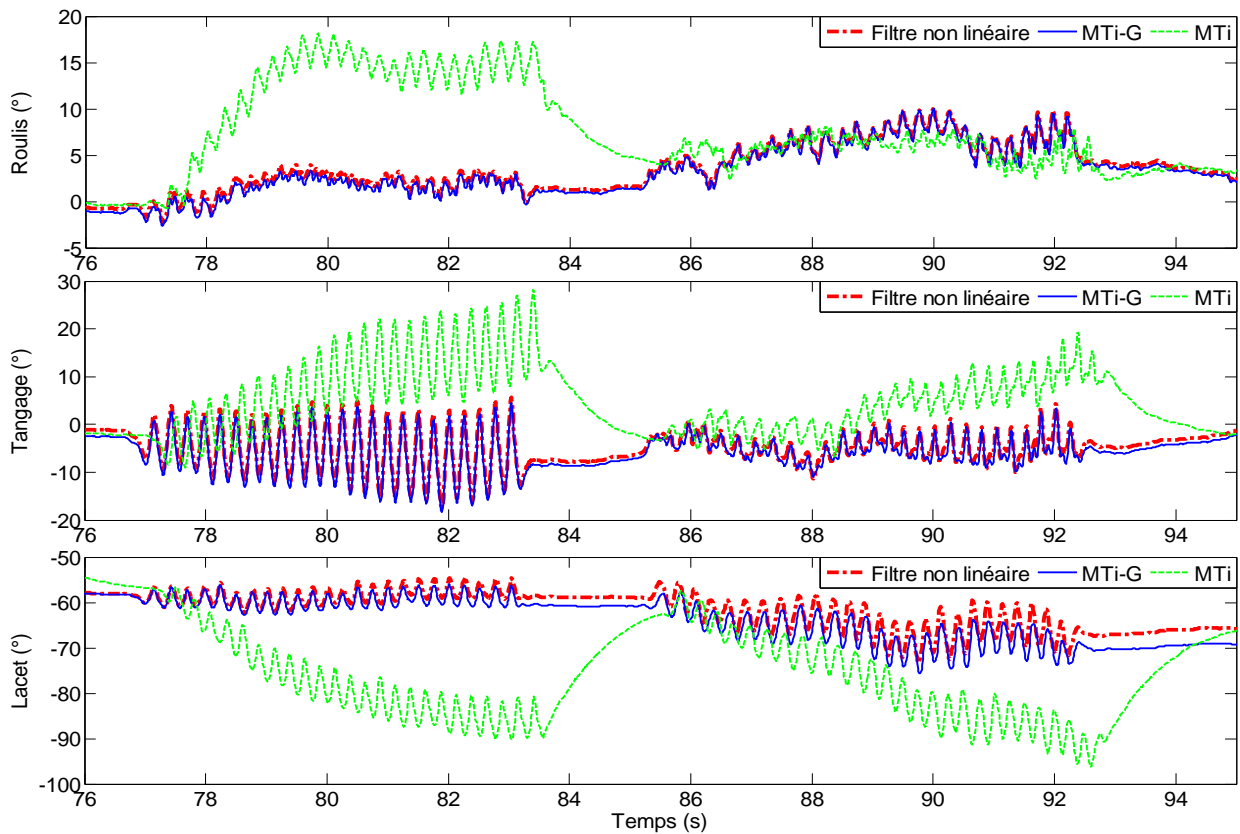


Fig. 4.36. Un zoom de l'intervalle [76 ; 95 sec] de la figure 4.35

4.6.2. Comparaison des performances avec des méthodes du Bio-logging

Nous établissons dans ce paragraphe une étude comparative entre les performances d'estimation de l'attitude obtenues à partir de trois méthodes : le filtre complémentaire et deux autres approches qui ont été proposées en *Bio-logging* que nous allons appeler par la suite *méthode_1* (Wilson *et al.*, 2008) et *méthode_2* (Watanabe *et al.*, 2005). Ces deux approches utilisent uniquement une combinaison d'accéléromètre et de magnétomètre triaxiaux et fournissent une estimation de l'orientation sous forme d'angles d'Euler.

Le but de cette comparaison est d'établir une analyse des performances du filtre complémentaire. Le but essentiel est de monter s'il est possible d'apporter une amélioration aux résultats d'estimation de l'attitude par rapport à ce qui existe actuellement au *Bio-logging* et de prouver l'intérêt de rajouter des gyromètres dans une telle application.

Cette comparaison est réalisée dans le cas des deux essais effectués sur le chien et sur le cheval, présentés précédemment. Pour cela nous avons utilisé les données inertielles et magnétiques issues de ces deux essais et enregistrées par la *MTi-G*. Afin de comparer les trois méthodes, l'attitude estimée sous forme de quaternion par le filtre complémentaire est transformée en angles d'Euler en utilisant les formules de passage présentées en annexe D.1. Les résultats d'estimation de l'attitude obtenus par les trois approches (*méthode_1*, *méthode_2* et le filtre complémentaire) sont comparés à ceux fournis par l'algorithme interne de la *MTi-G*.

4.6.2.1. Résultats issus de l'essai expérimental sur le chien

♦ Comparaison des résultats d'estimation de l'attitude

Les résultats de cette comparaison, illustrés dans la figure 4.37, montrent les courbes d'erreurs obtenues à partir de la différence établie entre les estimations des angles d'Euler issues de la *MTi-G* et celles fournies par les trois méthodes (Fourati *et al.*, 2009e). A partir de cette figure, nous remarquons que la plus petite différence a été obtenue avec le filtre complémentaire. Cette erreur, montrée précédemment dans la figure 4.23, ne dépasse pas 5° sur les trois angles d'Euler même au cours des mouvements à hautes fréquences de l'animal, où l'accélération propre est importante. Les erreurs d'estimation obtenues par la *méthode_1* et la *méthode_2* sont nettement plus grandes et dépassent 10° pour les angles de roulis et tangage et 20° pour l'angle de lacet. Comme cela a été expliqué dans le chapitre 2, ces grandes erreurs sont dues principalement aux approximations établies dans ces deux méthodes puisque l'accéléromètre ne permet pas d'extraire l'attitude lors des phases dynamiques du mouvement. Ces dynamiques à hautes fréquences sont présentes très souvent lors du déplacement du chien.

L'analyse de la performance de chaque méthode peut être établie en utilisant également la moyenne quadratique appelée **RMSD**⁵¹. Ce critère permet de quantifier la

⁵¹ **RMSD** : Root Mean Square Deviation

différence entre les angles d'Euler calculés par la *MTi-G*, considérée comme référence, et ceux estimés par chaque méthode.

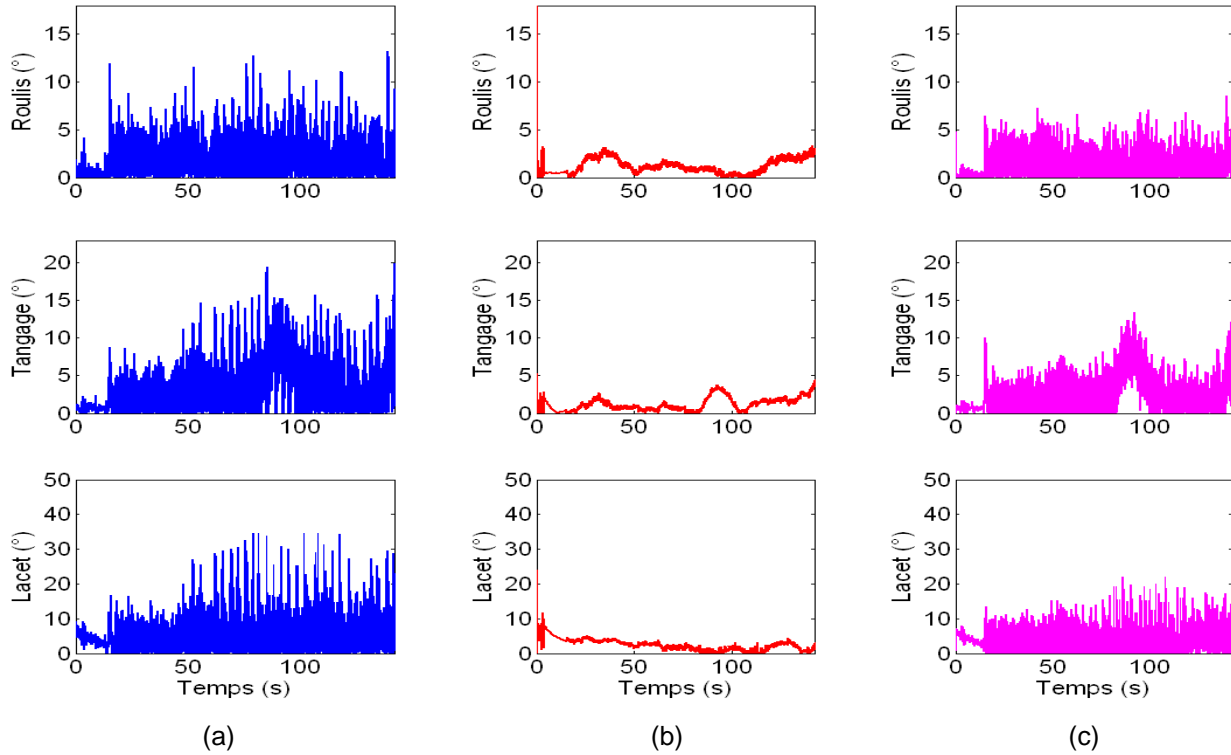


Fig. 4.37. Evolution de l'erreur d'estimation des angles d'Euler au cours du mouvement réalisé par le chien - (a) différence entre la *MTi-G* et la *méthode_1* - (b) différence entre la *MTi-G* et le filtre complémentaire - (c) différence entre la *MTi-G* et la *méthode_2*

Pour une évaluation plus précise, nous avons choisi d'utiliser le critère suivant avec une fenêtre glissante :

$$RMSD_{glissante}(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^{n+k} (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (4.1)$$

avec

x_i : Angles d'Euler calculés par la *MTi-G*.

\hat{x}_i : Angles d'Euler estimés par la méthode choisie (filtre complémentaire, *méthode_1* ou *méthode_2*).

N : Dimension de la fenêtre glissante choisie égale 2.

Une moyenne de la $RMSD_{glissante}$ relative aux angles d'Euler pour chaque méthode est établie par la suite dans le tableau 4.1. Notons que les plus petites valeurs de cette moyenne quadratique relatives aux trois angles d'Euler sont obtenues aussi avec le filtre complémentaire. Cela montre bien les améliorations que nous avons pu apporter au

niveau de l'estimation de l'attitude par rapport aux deux méthodes développées en *Bio-logging* à ce propos.

Méthodes	Filtre complémentaire	Méthode_ 1	Méthode_ 2
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Roulis)	0.934	1.6144	1.1846
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Tangage)	0.8609	2.4962	1.8019
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Lacet)	5.0426	19.1813	12.6655

Tab. 4.1. Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ relative aux angles d'Euler pour chaque méthode (essai sur le chien)

♦ Comparaison des résultats de calcul de la norme des accélérations propres

Nous nous intéressons maintenant au calcul des accélérations propres de l'animal durant son mouvement. Ces accélérations, appelées souvent DBA, sont liées uniquement au mouvement du corps de l'animal. Pour les calculer, nous exploitons les valeurs de l'attitude estimées par le filtre complémentaire au cours du mouvement du chien en utilisant l'équation suivante (Fourati *et al.*, 2009d):

$$\hat{a} = inv(M_N^B(\hat{q}))f - G \quad (4.2)$$

avec $M_N^B(\hat{q})$ est la matrice de rotation exprimée en termes de quaternion et définie dans (1.26). $G \in \mathbb{R}^3$ est le vecteur gravité et $f \in \mathbb{R}^3$ représente la mesure de l'accéléromètre. Nous calculons par la suite la norme de l'accélération propre en utilisant l'équation suivante :

$$\|\hat{a}\|_2 = \sqrt{\hat{a}_x^2 + \hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2} \quad (4.3)$$

Les mesures d'attitude issues de la *MTi-G* sont utilisées également dans l'équation (4.2) pour extraire les valeurs des accélérations propres qui sont considérées comme référence de comparaison. De la même façon, nous avons calculé l'attitude par la *méthode_1* (Wilson *et al.*, 2008) et la *méthode_2* (Watanabe *et al.*, 2005). Par la suite, l'attitude déduite de chaque méthode est utilisée pour calculer l'accélération propre de l'animal en utilisant (4.2). Finalement, la norme de l'accélération propre est calculée en utilisant (4.3). Ainsi, il est maintenant possible d'établir une comparaison entre la norme de l'accélération propre calculée par le filtre complémentaire et celle obtenue par la *méthode_1* et par la *méthode_2*.

Nous rapportons dans la figure 4.38 les résultats de cette comparaison en établissant une différence entre la norme de l'accélération propre obtenue par la *MTi-G* et celle fournie par chaque méthode (filtre complémentaire, *méthode_1*, *méthode_2*). A partir de cette figure, nous remarquons que la plus petite différence est obtenue avec le filtre complémentaire. En effet, les erreurs au niveau du filtre complémentaire ne dépassent pas 0.7 m/s^2 , alors qu'elles atteignent 3 m/s^2 pour la *méthode_1* et 2 m/s^2 pour la *méthode_2*. Ainsi, ces résultats prouvent les améliorations apportées par l'approche proposée pour le calcul de l'accélération propre de l'animal. Nous rappelons qu'un calcul plus précis de l'accélération propre permet aux biologistes une meilleure évaluation de la dépense énergétique de l'animal par la suite.

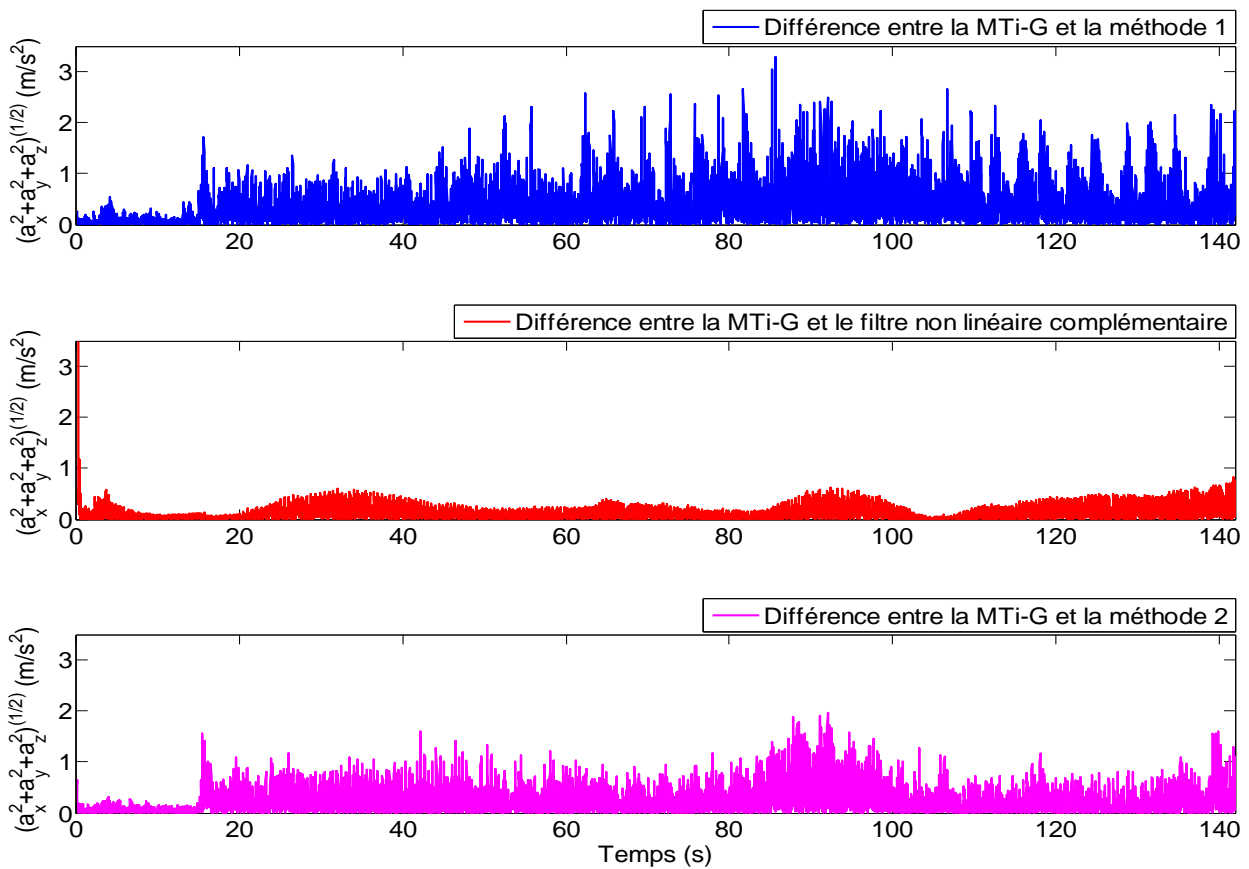


Fig. 4.38. Evolution de l'erreur d'estimation de la norme des accélérations propres du chien

De la même façon, nous avons utilisé la moyenne quadratique $RMSD_{glissante}$ donnée dans (4.1) pour mesurer la différence entre la norme de l'accélération calculée par la *MTi-G* (référence) et celle estimée par chaque méthode.

On note que :

x_i : La norme de l'accélération propre calculée par la *MTi-G*.

\hat{x}_i : La norme de l'accélération propre estimée par la méthode choisie (filtre complémentaire, *méthode_1* ou *méthode_2*).

Le tableau 4.2 regroupe les différentes moyennes de la $RMSD_{glissante}$ relatives à la norme de l'accélération propre pour chaque méthode. Notons que nous avons obtenu la plus petite valeur de cette moyenne en utilisant le filtre complémentaire. Ainsi, ce critère utilisé témoigne de la capacité du filtre de fournir un calcul plus précis des accélérations propres de l'animal.

Méthodes	Filtre complémentaire	Méthode_1	Méthode_2
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$	0.1168	0.3351	0.1929

Tab. 4.2. Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ relative à la norme de l'accélération propre pour chaque méthode (essai sur le chien)

4.6.2.2. Résultats issus de l'essai expérimental sur le cheval

♦ Comparaison des résultats d'estimation de l'attitude

Les résultats de cette comparaison, donnés dans la figure 4.39, montrent les courbes d'erreurs établies à partir de la différence entre les estimations des angles d'Euler par la *MTi-G* et celles fournies par les trois méthodes (Fourati *et al.*, 2010a). A partir de cette figure, nous remarquons que la plus petite différence a été obtenue également avec le filtre complémentaire. Cette erreur, montrée précédemment dans la figure 4.31, ne dépasse pas 2° pour les angles de roulis et tangage et 5° pour l'angle de lacet, et ceci même lors de mouvements à hautes fréquences de l'animal ([80 ; 140 sec]). Les erreurs d'estimation obtenues avec la *méthode_1* et la *méthode_2* sont largement plus grandes et dépassent 15° pour le roulis, 10° pour le tangage et 30° pour le lacet.

Comme cela a été expliqué dans le chapitre 2, ces grandes erreurs sont dues principalement au fait que les accéléromètres ne sont pas de bons capteurs d'attitude durant des phases dynamiques d'un mouvement. Par conséquent, les approximations faites sur les mesures de l'accéléromètre dans ces méthodes engendrent des erreurs plus importantes, surtout pendant les phases dynamiques de mouvement du cheval.

Nous avons utilisé également la moyenne quadratique $RMSD_{glissante}$ donnée dans (4.1) afin d'évaluer numériquement la performance de chaque méthode. Le tableau 4.3 regroupe la moyenne de la $RMSD_{glissante}$ relative aux angles d'Euler pour chaque méthode.

Nous remarquons que pour l'essai sur le cheval, la plus petite valeur de cette moyenne quadratique est obtenue aussi avec le filtre complémentaire. Cela confirme les résultats montrés dans la figure 4.39 et illustre les améliorations nettes apportées par le filtre complémentaire.

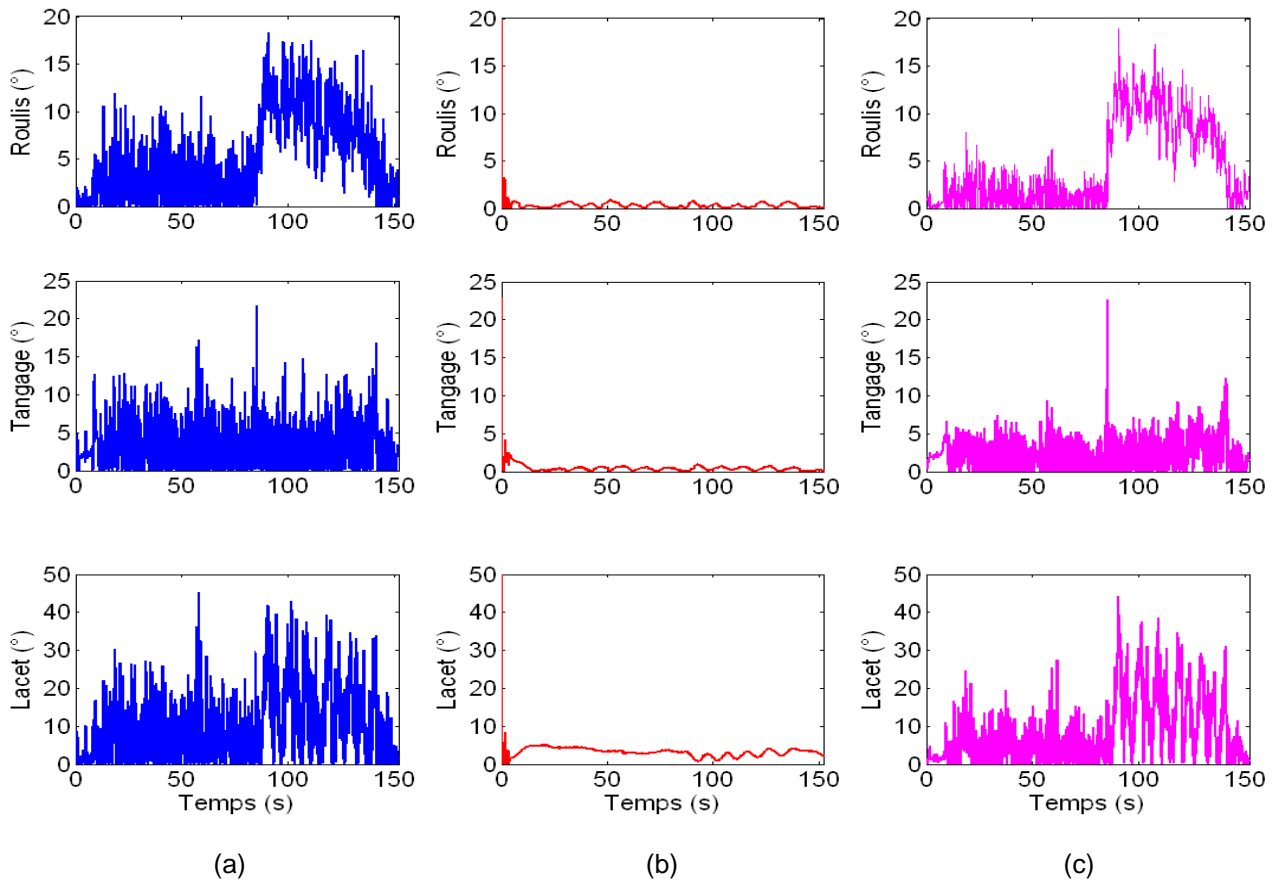


Fig. 4.39. Evolution de l'erreur d'estimation des angles d'Euler au cours des déplacements du cheval - (a) différence entre la *MTi-G* et la *méthode_1* - (b) différence entre la *MTi-G* et le filtre non linéaire complémentaire - (c) différence entre la *MTi-G* et la *méthode_2*

Méthodes	Filtre complémentaire	Méthode_1	Méthode_2
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Roulis)	0.2860	3.5936	3.2008
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Tangage)	0.3091	2.6340	1.9212
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ (Lacet)	4.8055	13.0174	11.4340

Tab. 4.3. Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ relative aux angles d'Euler pour chaque méthode (essai sur le cheval)

♦ Comparaison des résultats de calcul de la norme des accélérations propres

Nous nous intéressons aussi dans cet essai au calcul des accélérations propres du cheval durant son mouvement. Afin de les extraire, nous exploitons encore les valeurs d'attitude estimées par le filtre complémentaire au cours de cet essai tout en utilisant (4.2)

(Fourati *et al.*, 2009d). Nous avons calculé par la suite la norme de l'accélération propre en se servant de (4.3). Les mesures d'attitude issues de la *MTi-G* à partir de (4.2) permettent d'extraire les valeurs des accélérations propres. De même, nous avons calculé l'attitude par la *méthode_1*, et la *méthode_2*. Puis l'attitude déduite de chaque méthode est utilisée pour calculer l'accélération propre de la tête du cheval en utilisant (4.2). Finalement, la norme de l'accélération propre est calculée par le biais de (4.3). Ainsi, il est maintenant possible d'établir une comparaison entre la norme de l'accélération propre calculée par le filtre complémentaire et celle obtenue par la *méthode_1* et par la *méthode_2*.

La figure 4.40 présente les résultats de la comparaison établie entre les trois méthodes. Cette comparaison est réalisée en calculant la différence entre la norme de l'accélération propre obtenue par la *MTi-G* et celle fournie par les trois méthodes. A partir de cette figure, nous remarquons, là encore, que la plus petite différence est obtenue avec le filtre complémentaire. En effet, les erreurs au niveau du filtre complémentaire ne dépassent pas 0.5 m/s^2 , alors qu'elles atteignent 3 m/s^2 pour la *méthode_1* et la *méthode_2*. Ces valeurs illustrent encore les améliorations apportées par le filtre complémentaire au niveau du calcul de l'accélération propre du cheval.

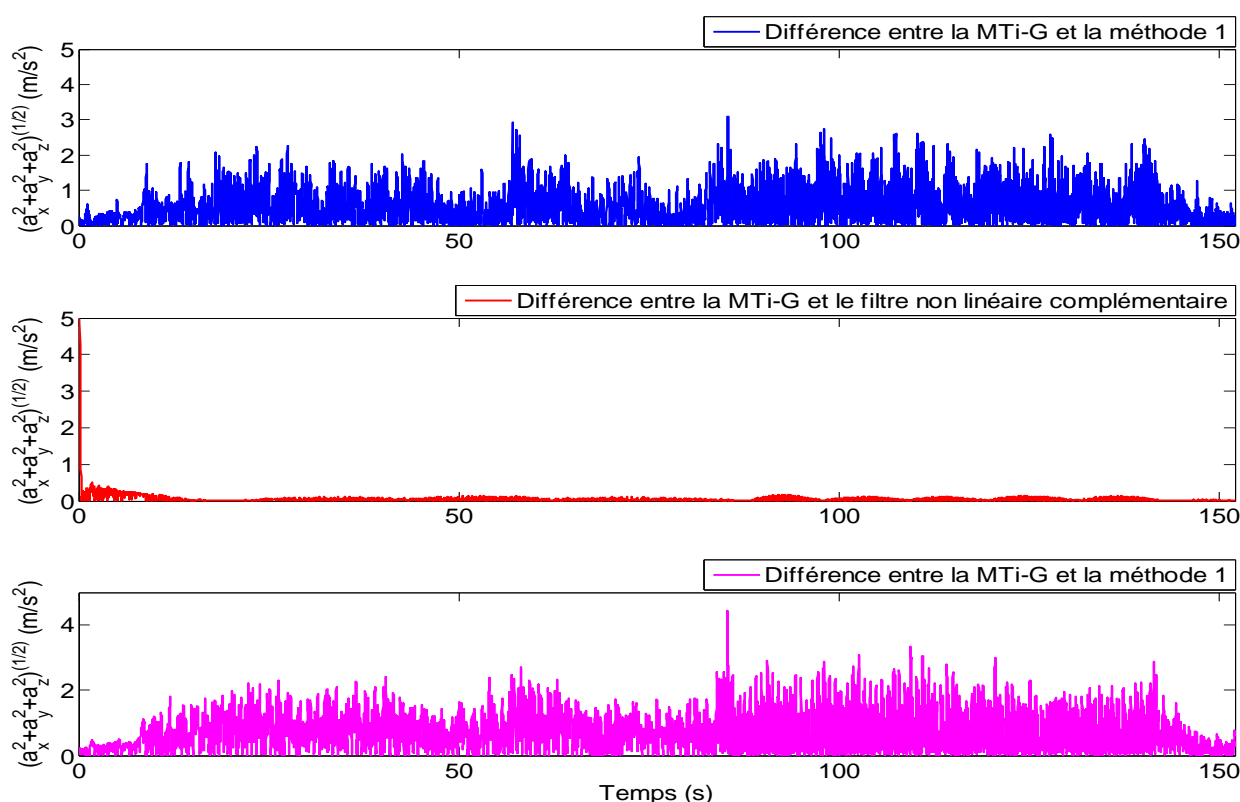


Fig. 4.40. Evolution de l'erreur d'estimation de la norme des accélérations propres du cheval

De la même façon, nous avons utilisé la moyenne quadratique $RMSD_{glissante}$ donnée par l'équation (4.1) pour mesurer la différence entre la norme de l'accélération propre calculée par la *MTi-G* et celle estimée par chaque méthode. Le tableau 4.4 regroupe les différentes moyennes de la $RMSD_{glissante}$ relatives à la norme de l'accélération propre pour chaque

méthode. Notons également que la plus petite valeur de cette moyenne a été obtenue par le filtre complémentaire. Cela témoigne encore de la capacité du filtre de donner un calcul plus précis des accélérations propres de l'animal.

Méthodes	Filtre complémentaire	Méthode_1	Méthode_2
Moyenne de la $RMSD_{glissante}$	0.0422	0.4506	0.5745

Tab. 4.4. Moyenne de la $RMSD_{glissante}$ relative à la norme de l'accélération propre pour chaque méthode (essai sur le cheval)

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, les algorithmes d'estimation de l'attitude proposés ont été testés avec des données réelles provenant d'une centrale inertielle du marché (*MTi-G*). Cette dernière, par son algorithme interne, permet de calculer l'attitude sous forme de quaternion à partir d'une fusion de mesures issues d'une triade de capteurs formée par un accéléromètre, un magnétomètre et un gyromètre en plus d'un module GPS.

Dans la première partie, nous avons réalisé trois essais expérimentaux dans lesquels la centrale inertielle *MTi-G* a été utilisée comme référence de mesure de l'attitude. Dans le premier essai, nous avons estimé l'attitude de la *MTi-G* au cours d'un mouvement aléatoire. Le deuxième essai a été consacré à l'estimation de l'attitude au cours d'un mouvement de membre humain. Finalement, dans le troisième essai nous nous sommes dirigés vers une application d'estimation de la posture d'un chien et d'un cheval. Les résultats d'estimation de l'attitude obtenus à partir des approches proposées dans ce travail sont suffisamment satisfaisants. De petites différences sur le calcul des quaternions et des angles d'Euler ont été observées par rapport aux résultats fournis par l'algorithme interne de la *MTi-G*, bien que cette centrale utilise aussi des mesures GPS pour améliorer la précision de son calcul de l'attitude. Nous avons également conclu qu'il est possible de maintenir les mêmes performances d'estimation de l'attitude sans avoir recours à une étape d'estimation/recalage du biais dans les gyromètres.

Dans la deuxième et dernière partie de ce chapitre, nous avons réalisé une analyse de performances des estimations de l'attitude et des accélérations propres obtenues à partir du filtre complémentaire. Cette analyse a été menée à travers des comparaisons à une centrale d'attitude *MTi* puis à deux méthodes d'estimation de l'attitude développées en *Bio-logging*. Ces comparaisons illustrent bien les améliorations que nous avons pu apporter que ce soit par rapport à un système commercialisé ou aussi dans le cadre des travaux publiés en *Bio-logging*.

Chapitre 5

Navigation à l'estime : approche préliminaire pour la reconstitution des déplacements 3D en vue d'une application au Bio-logging

5.1. Introduction

Ce chapitre que nous pouvons déjà appeler «*pré-perspective*» retrace nos travaux les plus récents dans le cadre du projet *NaviMeles*. En effet, il s'attaque au second objectif du projet qui tourne autour de la reconstruction des déplacements de l'animal. Nous posons donc les bases des prochains travaux et nous avons préféré faire profiter le lecteur de ces dernières avancées. Ainsi, au cours de ce chapitre, nous nous intéressons à la thématique de la navigation à l'estime qui consiste à déduire la position d'un mobile depuis sa dernière position connue. Notre motivation est d'aller vers l'estimation de la position 3D de l'animal.

Nous proposons d'abord une approche préliminaire pour la reconstruction des déplacements 3D chez l'Homme. L'idée principale repose sur la double intégration des accélérations propres calculées en exploitant l'attitude estimée via les méthodes proposées dans le chapitre 3. Notre but est d'illustrer l'amélioration pouvant être apportée lors de l'intégration des mesures issues de l'accéléromètre pour remonter à la position d'un mobile. De plus, nous pouvons vérifier la cohérence des estimations de l'attitude obtenues grâce aux méthodes précédemment proposées. Nous validons finalement la performance de l'approche proposée à l'aide de quelques essais expérimentaux tout en nous servant de la centrale d'attitude *MTi* comme outil de mesure.

Transposer cette approche vers la reconstitution des déplacements 3D de l'animal dans le cadre du *Bio-logging* est une perspective envisageable dans un futur proche.

5.2. Reconstitution des déplacements 3D par une technique de navigation à l'estime

La problématique d'estimation de la position est une question d'actualité dans le domaine du *Bio-logging*. La connaissance d'une position approchée de l'animal permet d'identifier ses modes de vie et ses comportements. La méthode la plus utilisée actuellement par les biologistes pour la reconstitution du trajet de l'animal dans son milieu naturel repose sur l'utilisation des techniques de géolocalisation satellitaire par balise GPS attachée au corps de l'animal (Bograd *et al.*, 2010). L'obstacle limitant la technique est la présence d'une constellation de satellites suffisante dans l'horizon de déplacement de l'animal. La transmission des signaux provenant de la constellation peut en effet être altérée, voire interrompue selon les circonstances par les obstacles naturels que représentent les reliefs, la couverture végétale ou le milieu aquatique en général.

Pour des animaux marins plongeurs, tels les manchots, ou pour des animaux terrestres forestiers ou cavernicoles, tels les blaireaux, seules de courtes fenêtres temporelles restent accessibles. Un autre problème est celui du coût énergétique lié à la transmission radio-satellitaire, qui implique souvent pour des balises adaptées à la masse corporelle de l'animal (valeur seuil $< 4\%$) de faire des compromis sur la fréquence d'échantillonnage des localisations. Par exemple, des colliers GPS disponibles aujourd'hui sur le marché (Televilt) et compatibles pour un blaireau d'Europe (collier de 450g pour une masse corporelle d'environ 12kg) permettent une autonomie de 3 *mois* d'enregistrement si les localisations sont effectuées une fois par heure toutes les nuits et toutes les 5 *min* une nuit tous les 14 *jours*. Pour améliorer la continuité des localisations et donc la précision de la reconstitution du parcours 3D, l'idée est d'essayer de coupler dans le futur l'approche GPS avec celle de la navigation à l'estime (ou *dead reckoning* en anglais). La navigation à l'estime est une approche déjà utilisée sur l'animal. Elle repose sur l'estimation des trois angles de l'attitude (via des accéléromètres et des magnétomètres tri-axiaux) et de la vitesse de déplacement (via un capteur de vitesse) à une fréquence de l'ordre du *Hz*, ce qui pour le moment n'a été abordé que sur des espèces marines (Wilson *et al.*, 2007 ; Elkaim *et al.*, 2006). En effet, mesurer chez un animal, se déplaçant au sol ou volant, la vitesse de déplacement avec précision est encore aujourd'hui hors d'atteinte. Par ailleurs, les capteurs de vitesse utilisés sur les animaux marins restent imprécis et impliquent un effet de traîne (*drag effect*) qui gêne l'animal.

Dans ce contexte, l'idée était de tester l'approche de la navigation à l'estime avec uniquement une unité inertielle. Cela suppose donc de reconstituer à la fois l'attitude et la vitesse de l'animal uniquement par des mesures proprioceptives : l'accélération, le champ magnétique et la vitesse angulaire. Dans ce chapitre, nous testons expérimentalement cette approche dans le cas de la marche humaine, afin de remonter à la position 3D à partir de l'intégration des mesures de l'accélération propre. De nombreuses applications pratiques de cette approche seraient envisageables chez l'humain avec comme exemple

l'aide aux malvoyants. Nous espérons par la suite l'appliquer à l'animal sauvage dans le contexte du *Bio-logging*.

5.2.1. Méthode utilisée : application à la marche d'un sujet humain

L'approche que nous proposons dans ce paragraphe se base sur la technique de la navigation à l'estime. Cette technique consiste à déduire la position d'un mobile depuis sa dernière position connue. Afin de remonter à l'information de la position, nous avons utilisé la relation physique existante entre l'accélération propre estimée \hat{a} du mobile et sa position estimée \hat{p} et qui se traduit par les deux équations suivantes :

$$\hat{v}(t) = \int_{T_1}^{T_2} \hat{a}(t).dt \quad (5.1)$$

$$\hat{p}(t) = \int_{T_1}^{T_2} \hat{v}(t).dt \quad (5.2)$$

où \hat{v} représente la vitesse linéaire estimée du mobile et $[T_1 ; T_2]$ dénote la période d'échantillonnage pour l'intégration.

L'accélération propre \hat{a} du mobile peut être déduite de l'équation (4.2) :

$$\hat{a} = \text{inv}(M_N^B(\hat{q}))f - G \quad (5.3)$$

avec $M_N^B(\hat{q})$ est la matrice de rotation définie dans (1.26). Elle est exprimée en terme du quaternion estimé à l'aide d'une des approches proposées dans le chapitre 3. $G \in \mathbb{R}^3$ est le vecteur de gravité et $f \in \mathbb{R}^3$ représente la mesure issue de l'accéléromètre.

En se basant uniquement sur les équations (5.1) et (5.2), une dérive importante et très rapide apparaît au niveau du calcul de la position. Cette dérive était prévisible, elle est due principalement aux bruits de mesures présents dans le signal de l'accéléromètre f et leur intégration numérique lors de l'utilisation de (5.1) et (5.3). Afin de remédier à ce problème, nous avons choisi d'introduire une technique de recalage déjà proposée pour la navigation pédestre (Ladetto, 2003 ; Ojeda et Borenstein, 2007). L'idée consiste à utiliser une unité de mesure inertielle (IMU) attachée au pied d'un humain. Ainsi, les mesures issues de l'accéléromètre nous permettent de détecter les instants où la norme de l'accélération totale f est égale à la gravité. A ces moments, il existe en principe un instant t où l'accélération propre \hat{a} et la vitesse \hat{v} s'annulent théoriquement puisque le pied touche le sol comme le montre la figure 5.1. Mais en pratique nous observons le cas contraire. Nous avons donc testé la validité de procéder à une correction de la vitesse pour la remettre à zéro à ces instants précis.

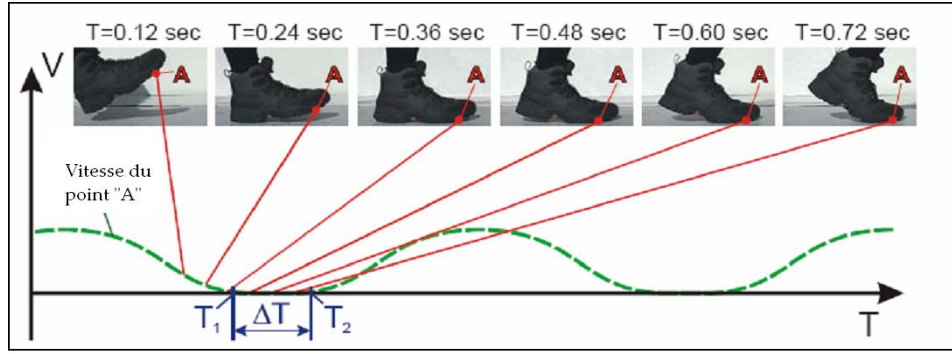


Fig. 5.1. Différentes phases lors du pas d'un humain. Durant ΔT , toutes les vitesses et les accélérations du point « A » sont théoriquement égales à zéro

Dans une première étape, nous calculons la norme carrée de l'accélération totale $\|f\|_2^2$ en utilisant la formule suivante :

$$\chi = \|f\|_2^2 = f_x^2 + f_y^2 + f_z^2 \quad (5.4)$$

Nous effectuons par la suite la moyenne mo de χ sur un intervalle d'échantillons donné e :

$$mo = \frac{\chi}{e} \quad (5.5)$$

Ensuite, nous calculons la variance de cette norme sur une fenêtre glissante en utilisant l'équation suivante (Rajagopal, 2008) :

$$V_e(j) = \frac{1}{e-1} \sum_{i=j-e+1}^{i=j} (\chi_i - mo_j)^2 \quad (5.6)$$

où χ_i est la norme carrée de l'accélération totale $\|f\|_2^2$ et mo_j est la moyenne de χ_i sur l'intervalle d'échantillons choisi e .

La variance de la norme carrée est utilisée pour détecter les instants importants de la marche du sujet tels que celui où le pied touche le sol (accélération propre \hat{a} théoriquement nulle). L'intervalle d'échantillons e doit être bien choisi afin que le test de la variance soit suffisamment sensible aux changements lents et rapides du signal accélérométrique.

Afin de détecter les instants où l'accélération propre \hat{a} s'annule, nous imposons que la valeur de la variance V_e soit inférieure à une limite L :

$$V_e < L \quad (5.7)$$

A chaque fois où la condition (5.7) est réalisée, il est nécessaire de remettre les composantes du vecteur vitesse \hat{v} à zéro avant d'utiliser les équations (5.1) et (5.2). Dans le cas contraire, la procédure d'intégration utilisant ces deux équations se fait normalement sans aucun recalage de la vitesse.

5.2.2. Résultats expérimentaux obtenus lors de la marche d'un sujet humain

Afin d'examiner la précision du calcul de la position par l'approche proposée précédemment, nous avons choisi d'effectuer comme première application de ce travail des essais expérimentaux au cours des déplacements d'un sujet humain. La centrale d'attitude *MTi* a été utilisée afin de recueillir les mesures inertielles et magnétiques qui seront nécessaires aussi à l'estimation de l'attitude. Cette centrale a été attachée à l'extrémité du pied d'un sujet comme le montre la figure 5.2 afin d'enregistrer les différentes mesures pendant un épisode de marche de quelques minutes.



Fig. 5.2. Centrale d'attitude *MTi* attachée au pied d'un sujet au cours du déplacement

L'intérêt d'attacher la centrale à ce segment humain réside dans la possibilité d'obtenir une norme de l'accélération propre presque nulle (la norme de l'accélération totale est proche de la gravité) à chaque fois où le pied touche le sol. Afin d'avoir une référence indépendante et précise sur le parcours 3D effectué, nous avons choisi de réaliser un chemin connu le long des couloirs de notre laboratoire CReSTIC à Reims. Ce parcours prend la forme d'un rectangle (de dimensions $\approx 2 \times (22 \text{ mètres} \times 19 \text{ mètres})$) situé dans un plan parfaitement horizontal comme le montre la figure 5.3.

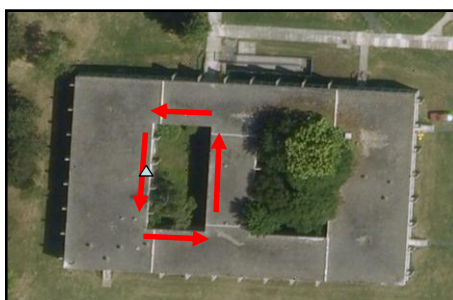


Fig. 5.3. Chemin réalisé au sein du CReSTIC

Afin d'estimer l'évolution de l'attitude tout au long du déplacement, nous avons exploité les résultats issus du filtre complémentaire (3.44) proposé dans le chapitre 3. L'attitude

estimée sous forme de quaternion \hat{q} sert par la suite à calculer les accélérations propres \hat{a} à partir de l'équation (5.3). Ensuite, nous avons calculé les différentes valeurs de la norme carrée de l'accélération totale χ_i en utilisant (5.4). La moyenne mo_j relative à cette accélération est calculée ensuite par le biais de (5.5) tout en choisissant un intervalle d'échantillons $e = 8$. Ce choix se base sur des travaux de la littérature qui mentionnent que la valeur de cet intervalle doit être choisie entre 5 et 10 pour la marche des humains (Ojeda et Borenstein, 2007 ; Rajagopal, 2008). Ensuite, les valeurs de la variance V_e sont déduites en utilisant (5.6).

La figure 5.4 regroupe l'ensemble des valeurs de la norme carrée de l'accélération totale χ_i , de la moyenne mo_j , de la variance $V_e(j)$ et les instants de détection du pas. Finalement, nous avons appliqué les deux équations (5.1) et (5.2) pour extraire la position estimée de la personne le long de son parcours. A chaque période d'intégration, la condition (5.7) est testée afin de remettre les composantes du vecteur vitesse \hat{v} à zéro lorsque cette dernière est vérifiée (détecteur de pas). La limite L dans cette équation a été réglée expérimentalement (selon la nature de la marche humaine) afin de pouvoir bien détecter et différencier les phases de marche des phases de repos (touchée du sol par le pied). La figure 5.4 montre que notre approche arrive à localiser les phases où le pied touche le sol. En effet le détecteur montré dans cette figure se met à 1 lorsque le pied est en contact avec le sol et bascule à 0 lors de la phase de pas.

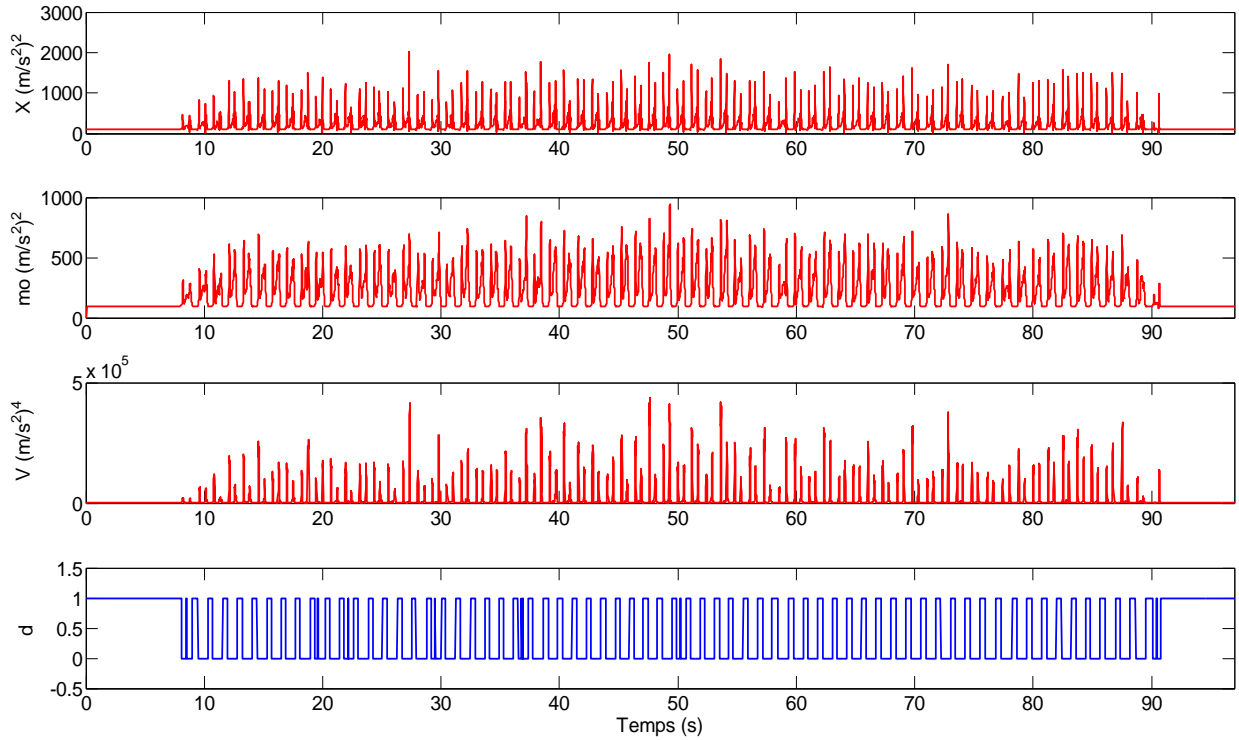


Fig. 5.4. La norme carrée de l'accélération totale χ_i , la moyenne mo_j , la variance $V_e(j)$ et les instants de détection du pas (détecteur)

L'estimation de la vitesse linéaire de déplacement est tracée dans la figure 5.5. Deux courbes sont montrées dans cette figure. Elles correspondent à une estimation de la vitesse avec et sans étape de remise à zéro. L'amélioration apportée par l'étape de recalage du calcul de la vitesse est évidente sur les trois axes au niveau de la première courbe (ligne solide par rapport à la ligne discontinue). Si nous ne pratiquons pas cette remise à zéro, les divergences observées sont dues en grande partie aux intégrations des bruits présents sur les mesures de l'accéléromètre.

Concernant l'estimation de la position, nous avons calculé dans une première étape la position 3D de la personne en utilisant la procédure usuelle d'intégration à partir des équations (5.1) et (5.2) uniquement. Nous avons ainsi obtenu le parcours 3D représenté dans la figure 5.6. Notons que nous avons choisi de commencer le calcul de la position à partir du point initial $(0,0,0)$. Une divergence rapide et totale au niveau du calcul de la position est observée sur cette figure. L'erreur commise est d'environ 300 mètres sur les trois axes X, Y, et Z. Les quatre singularités correspondantes aux 4 tournants à angle droit du parcours réel ne sont absolument pas détectées.

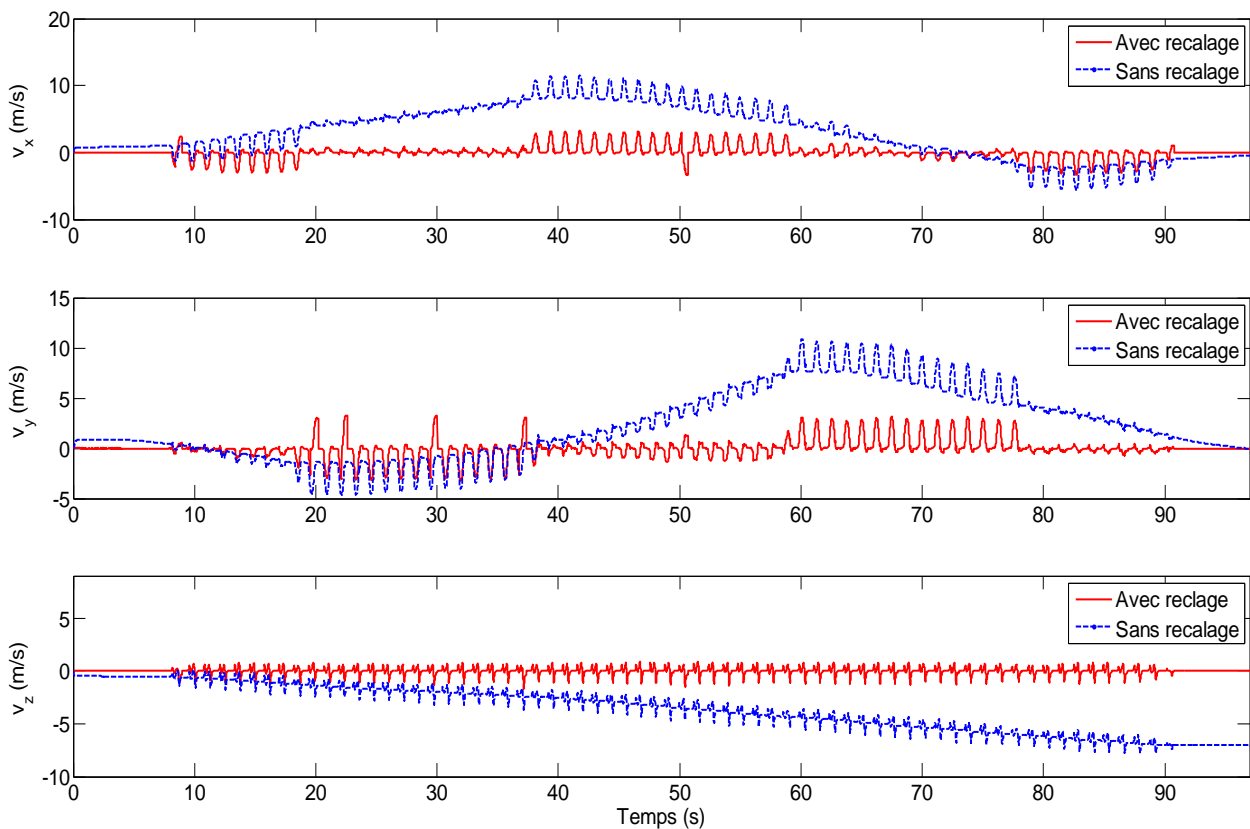


Fig. 5.5. Estimation de la vitesse linéaire \hat{v} avec et sans étape de recalage (remise à zéro)

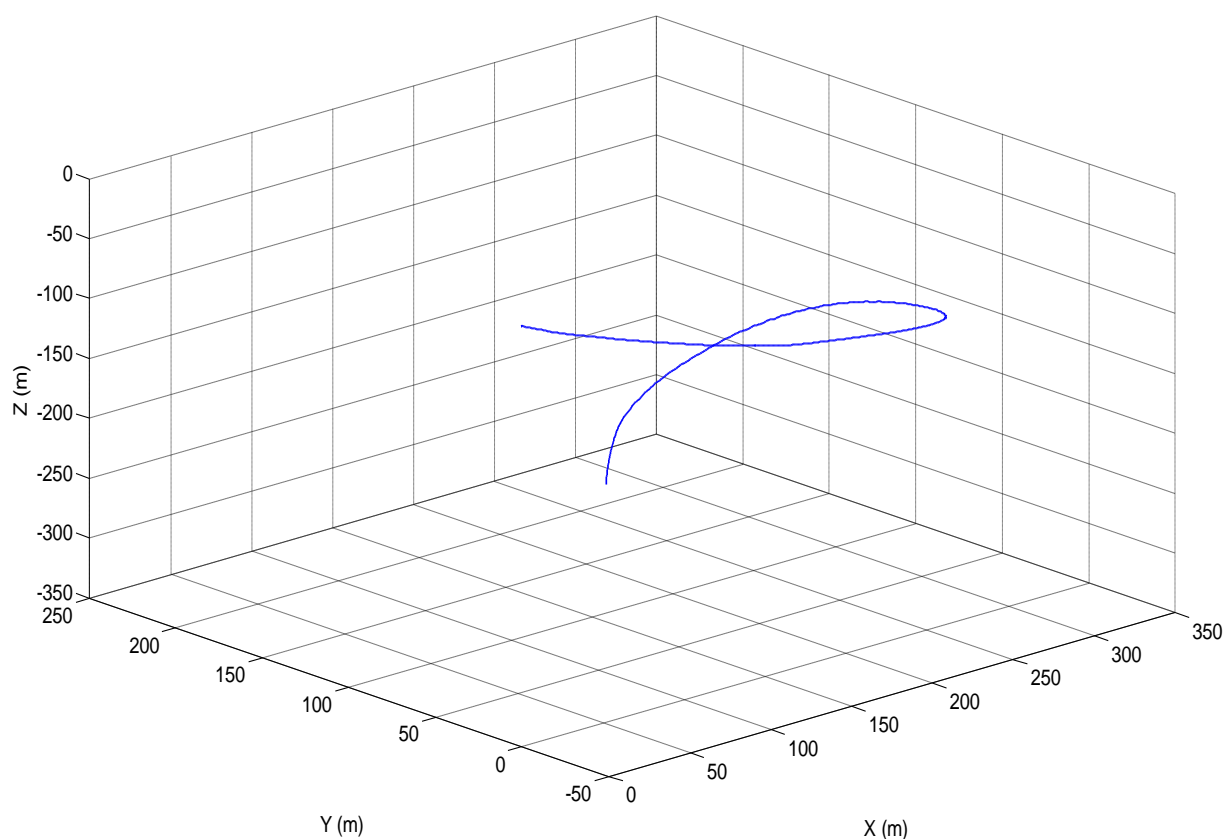


Fig. 5.6. Estimation de la position 3D au cours du déplacement en forme de rectangle au sein du CReSTIC (sans étape de recalage de la vitesse)

La figure 5.7 illustre l'amélioration apportée au niveau de l'estimation du parcours 3D après avoir effectué l'étape de recalage et de remise à zéro de la vitesse (en utilisant la condition (5.7)). Cette procédure seule permet d'obtenir une forme de parcours se rapprochant sensiblement du parcours réel dans les couloirs du CReSTIC, avec une erreur absolue variant entre 5 et 10 *mètres* sur les axes X et Y et ≈ 30 *cm* sur l'axe Z. La réduction de l'erreur de mesure en fin de parcours, apportée par l'étape de remise à zéro, est de l'ordre de 290 *mètres*.

Cette expérience préliminaire amène toute une série de questions qui n'ont pas encore été abordées dans le cadre de mon étude. D'abord, en quelle mesure la précision des estimations de l'attitude liée à notre filtre complémentaire (3.44) interviendrait-elle dans la précision relative de positionnement en fin de parcours ? Ensuite, quelles seraient les influences respectives de la durée totale du déplacement, ou de sa longueur totale (en mètres), sur la précision du calcul de la position en fin de parcours ? S'il est évident que l'adjonction de mesures de localisation GPS précises (à un pas de temps à déterminer) pourrait améliorer sensiblement les résultats, il nous semble que cette expérience préliminaire laisse l'espoir de pouvoir s'en affranchir !

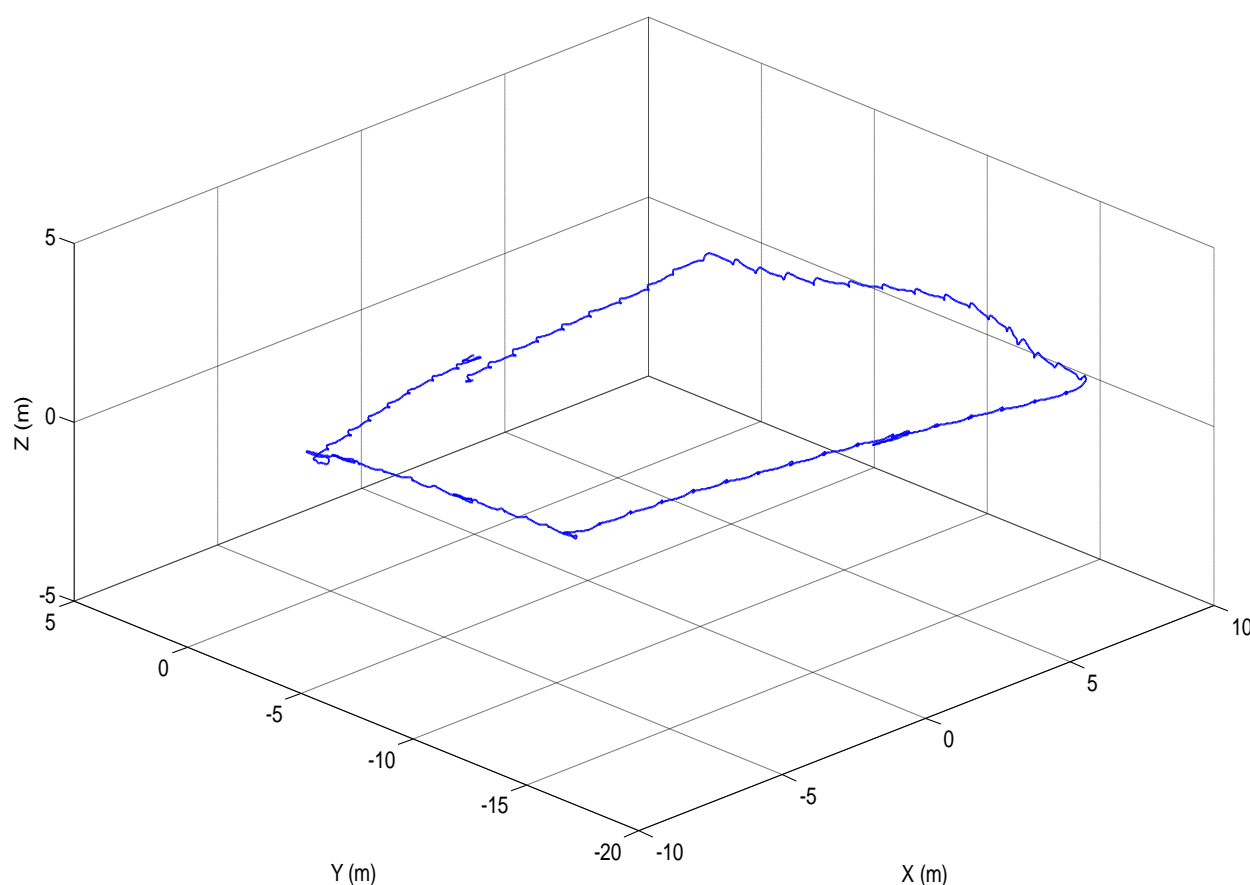


Fig. 5.7. Estimation de la position 3D au cours du déplacement en forme de rectangle au sein du CReSTIC (avec étape de recalage de la vitesse)

Ici une hypothèse a été faite sur un instant du mouvement lié à la locomotion bipède pour recaler fréquemment la vitesse de déplacement. Le mode de locomotion terrestre a cet avantage sur la nage ou le vol que, mis à part les éventuelles glissades ou dérapage quand le pied touche le sol (pelote plantaire ou semelle), l'absence de pas veut dire arrêt du mouvement, et la présence de pas implique une vitesse de déplacement évoluant dans une gamme définie. Cette dernière peut être connue ou mesurée pour chaque modèle biologique. D'autre part, les études en énergétique de la locomotion chez l'animal ou l'homme nous indiquent que tout individu utilise pour une allure donnée (pas, trot ou galop) une vitesse optimale d'un point de vue du rendement énergétique, appelé vitesse de croisière (Shepard *et al*, 2008). Nous notons qu'il n'était pas question dans le cadre de ce travail d'aborder ce type d'approche.

5.3. Conclusion et motivations vers l'application de la navigation à l'estime sur l'animal

Dans ce dernier chapitre, nous avons effleuré la question de la reconstitution de la position 3D d'un humain. Notre motivation finale est d'orienter l'approche proposée vers le domaine du *Bio-logging* afin d'accéder à la position 3D chez l'animal.

Dans la première partie, une approche préliminaire a été proposée en utilisant la procédure de double intégration des accélérations propres pour remonter à la position. Ces accélérations sont calculées en utilisant les estimations de l'attitude fournies par les approches proposées dans les chapitres précédents. La clé de cette méthode est l'introduction d'une étape de recalage de la vitesse permettant d'améliorer la précision du calcul de la position. Notons que ce recalage se fait toujours aux instants où la norme de l'accélération propre est nulle. Cette étape est souvent utilisée dans le contexte de la locomotion pédestre chez les humains.

Dans la deuxième partie, nous avons validé l'approche proposée au cours du déplacement d'un humain attachant à son pied la centrale d'attitude *MTi*. Les résultats expérimentaux obtenus montrent de larges améliorations apportées au niveau du calcul du parcours 3D en les comparant à une double intégration usuelle de l'accélération propre. Ces résultats confirment aussi la validité des estimations de l'attitude par les algorithmes proposés et nous encouragent à étendre cette approche au *Bio-logging* dans le cadre de la navigation à l'estime chez l'animal. Notre préoccupation majeure est d'arriver à détecter les instants pendant lesquels l'accélération propre de l'animal (DBA) est nulle durant son mouvement. Ces instants nous aideront à améliorer nettement l'estimation de la position comme c'est le cas chez les humains.

Conclusions et perspectives

Ce travail a permis de traiter des notions fondamentales de l'Automatique ainsi que des principes de la physique en vue de les appliquer à une thématique de recherche multidisciplinaire : le *Bio-logging*. Ce domaine s'intéresse particulièrement à l'étude du comportement de l'animal vivant en liberté et souvent loin de toute interaction avec l'observateur humain et ce à l'aide de microsystèmes attachés au corps.

Par ailleurs, ce livre est le fruit d'une collaboration entre le CReSTIC et le DEPE dans le cadre du projet interrégional *NaviMeles* (2008-2012). Ce travail de recherche est une contribution dans le domaine du *Bio-logging* sur l'estimation de l'attitude et de la posture chez l'animal. Nous avons ainsi proposé des solutions concrètes pour répondre aux premiers objectifs du projet. Cela nous a conduit à tracer des pistes de recherches sur l'évaluation de l'accélération propre (DBA) et la reconstitution de la position 3D de l'animal. Les partenaires du projet pourront ainsi mettre en œuvre les résultats scientifiques dans leurs propres applications : le 2C2A-CERFE, le GEPMA pour réaliser les essais sur le terrain et analyser les signaux issus de l'animal, et l'entreprise CMR-SMR pour la reconstitution spatiale du déplacement de leur vecteur spécialisé.

De manière générale, les **chapitres 1 et 2** présentent des notions introductives et en relation avec la problématique d'estimation de l'attitude d'un corps solide en général et son application en particulier à l'étude et l'estimation des mouvements de l'animal. Ces deux chapitres ont été présentés en suivant un enchaînement permettant au lecteur d'une part d'appréhender sans difficulté la thématique traitée dans ce livre et d'autre part de justifier les choix des outils utilisés dans ce travail. L'étude bibliographique établie dans le **chapitre 1** nous a permis de sélectionner la représentation des quaternions ainsi que la triade de capteurs formée d'accéléromètre, de magnétomètre et de gyromètre triaxiaux. Ces outils constituent une solution commode pour répondre aux problématiques d'estimation de l'attitude en *Bio-logging*. Dans le **chapitre 2**, nous avons présenté une synthèse bibliographique de la thématique du *Bio-logging* et des différentes approches

d'estimation de l'attitude chez l'animal qui constitue un des objectifs principaux du projet *NaviMeles*. Après avoir soulevé les principaux inconvénients de ces méthodes, les techniques d'estimation alternatives basées essentiellement sur des observateurs non linéaires et des filtres complémentaires sont présentées.

Les **chapitres 3 et 4** ont été consacrés à nos contributions en estimation de l'attitude au sein du *Bio-logging*. Tirant profit de l'algèbre des quaternions, le **chapitre 3**, propose trois approches différentes d'estimation de l'attitude, à savoir : un observateur non linéaire additif, un observateur à modes glissants et un filtre de type complémentaire. Les simulations réalisées sous Matlab à partir des données provenant d'une triade de capteurs combinant un accéléromètre, un magnétomètre et un gyromètre triaxiaux se sont avérées prometteuses et témoignent de la capacité de chaque méthode à reconstruire l'attitude de référence générée. Le **chapitre 4** a été réservé aux validations expérimentales des algorithmes d'estimation de l'attitude en utilisant des données réelles issues d'une centrale inertielle du marché (*MTi-G*) et aux analyses des performances de notre estimation de l'attitude comparée avec d'autres méthodes. Nous avons ainsi présenté les améliorations que nous avons pu apporter que ce soit par rapport à un système déjà commercialisé (*MTi*), par rapport à l'algorithme interne de la *MTi-G* ou par rapport à des travaux publiés en *Bio-logging* à ce propos.

Ainsi, les contributions essentielles qui ont pu être validées au cours de ces deux chapitres sont :

- ◆ Fiabilité de l'approche basée sur le filtre complémentaire pour l'estimation de l'attitude même en présence de fortes accélérations propres sur les mesures de l'accéléromètre et de dynamiques brusques de mouvement.
- ◆ Utilisation d'un produit de quaternion dans la phase de mise à jour du quaternion estimé à la place d'une somme. La technique de multiplication a été rarement utilisée dans ce genre de problématique et reste à notre connaissance intéressante lors de la manipulation des quaternions.
- ◆ Maintient des mêmes performances d'estimation de l'attitude sans avoir recours à une étape d'estimation/recalage du biais dans les gyromètres.
- ◆ Résultats d'estimation quasi identiques à ceux provenant d'une centrale inertielle *MTi-G* sans l'utilisation de mesures GPS.
- ◆ Résultats d'estimation nettement meilleurs que ceux d'une centrale d'attitude du marché (*MTi*) utilisant les mêmes types de capteurs.

Nous avons terminé ce livre par le **chapitre 5** qui constitue une ouverture vers le second objectif du projet *NaviMeles*. Il s'attaque à la problématique d'estimation de la position d'un mobile pour la reconstitution des déplacements 3D de l'animal par la technique de la navigation à l'estime. Nous avons énoncé les bases préliminaires pour remonter à la position. La clé de cette méthode est l'introduction d'une étape de réajustement de la vitesse permettant ainsi d'améliorer la précision du calcul de la position. Des essais expérimentaux ont été réalisés lors du déplacement d'un humain

portant une centrale d'attitude *MTi* attachée à son pied. Les premiers résultats montrent de larges améliorations apportées au niveau du calcul du chemin en comparaison à une double intégration usuelle de l'accélération propre.

Ici comme partout, tout commence au lieu de finir...

Ce premier travail dans le cadre du projet *Navimeles* a permis d'une part de répondre à certaines interrogations majeures des biologistes et d'autre part d'ouvrir de nouvelles pistes de recherches concernant la reconstitution de la posture et du parcours 3D chez l'animal vivant en liberté aussi que d'autres applications dans des domaines connexes. **Les perspectives de ce travail** sont multiples et constituent une continuité et/ou une amélioration des approches proposées dans ce livre. Nous pouvons ainsi les décliner sur *trois niveaux*, ceux en rapport direct avec les objectifs du projet *NaviMeles*, ceux en relation avec les besoins des partenaires du projet et ceux en liaison avec les aspects fondamentaux et expérimentaux des méthodes proposées dans ce travail :

Perspectives par rapport aux objectifs du projet...

- Les objectifs du projet *NaviMeles* sont pluridisciplinaires autour du *Bio-logging*. De manière générale, ce domaine de recherche s'intéresse à quatre grandeurs essentielles qui sont : **(1)** l'attitude, **(2)** l'accélération propre (DBA), **(3)** l'index énergétique et **(4)** la position 3D.

(1) En sus des méthodes développées dans la littérature du domaine, nous avons abouti à des résultats d'estimation significatifs avec une précision de mesure indépendante du mode de mouvement. Certes, une information sur l'attitude aurait permis de reconstituer l'orientation 3D d'un animal en utilisant une unité de mesure inertielle. Mais l'utilisation d'un tel système dans nos propres *loggers* posera plusieurs difficultés en termes de besoins en mémoire et surtout en énergie vu les périodes relativement longues pendant lesquelles le prototype devra fonctionner. A ce jour, la conception d'un prototype au sein de l'IPHC est en cours pour pouvoir l'adapter à la taille d'un manchot ou d'un blaireau. Certains défauts dans l'enregistrement du prototype ainsi que sa faible autonomie limitent encore ses performances. L'évaluation expérimentale des approches proposées dans ce livre sur le manchot ou le blaireau pourrait être entamée une fois que le prototype est complètement fonctionnel.

(2) et (3) : Comme il existe une liaison directe entre l'attitude, l'accélération propre (DBA) et l'index énergétique de l'animal, toute amélioration de la précision du calcul de l'attitude permettra de mieux évaluer au final le travail mécanique et les dépenses énergétiques chez l'animal. Il serait ainsi intéressant d'aller plus loin dans cette directive et d'établir l'index énergétique préliminaire d'un animal au cours d'un mouvement simple (sur un tapis roulant par exemple) en exploitant les estimations de l'attitude et des accélérations propres. Parallèlement, il est possible de calculer ce même index par respirométrie sur l'animal et de comparer par la suite les deux méthodes afin de juger la

fiabilité des estimations de l'attitude et des accélérations propres par les approches proposées.

(4) Nous avons traité dans le dernier chapitre la problématique de la navigation à l'estime chez l'Homme comme première application. Notre perspective est d'étendre l'approche proposée vers la reconstitution du parcours chez l'animal. Cela reste réalisable dans le cas d'un animal marcheur terrestre si nous arrivons à détecter les instants où sa patte touche le sol (accélération propre nulle) afin de réajuster sa vitesse linéaire (possibilité d'attacher le *logger* à la patte du blaireau par exemple). Nous envisageons également d'injecter dans la limite du possible des points GPS à une fréquence variable (entre 1 et 4 *Hz*) afin de recalibrer l'estimation de la position. Il est possible d'injecter des mesures de vitesses linéaires à partir d'un GPS ou d'un capteur de vitesse dans le but de corriger la dérive observée lors de l'intégration des accélérations propres. Parallèlement, il sera possible aussi de confronter les estimations de la vitesse (par intégration de l'accélération propre) à des données biologiques (variation de la vitesse dans une gamme biologique connue pour l'espèce étudiée par exemple) afin de la corriger et par conséquent réajuster le calcul de la position.

Perspectives par rapport aux besoins des partenaires du projet...

- Le travail proposé dans ce livre intéresse l'entreprise CMR-SMR partenaire de ce projet. Elle espère exploiter les méthodes de reconstitution de l'attitude et de la position pour ses propres applications visant principalement à la reconstitution spatiale du déplacement de leurs outils d'inspection dans les conduites souterraines. Les organismes 2C2A-CERFE et GEPMA s'intéressent aussi à nos travaux pour l'analyse de signaux issus de l'animal sur le terrain. Par ailleurs, une collaboration avec le laboratoire de l'Informatique du Parallélisme de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon a été entamée pour qu'il nous propose un premier prototype simplifié de ce nouveau bio-logger. Les travaux que nous menons en ce moment les intéressent directement dans l'un de leurs projets visant à reconstruire le mouvement des athlètes au cours du marathon des sables.

Perspectives par rapport aux aspects fondamentaux et expérimentaux du travail développé...

- Nous continuerons à étudier avec plus de détails les différents aspects de stabilité et de robustesse des approches d'estimation de l'attitude relatives à l'observateur à modes glissants et au filtre complémentaire. Nous aimerons ainsi étendre encore l'étude de robustesse de ces approches vers des contraintes plus fortes en utilisant par exemple l'analyse de stabilité au sens Entrée-Etat (**ISS**⁵²) (Sontag et Wang, 1995) de la dynamique d'erreur du quaternion.

⁵² **ISS** : Input-to-State Stability

- Nous envisageons aussi d'étendre les approches d'estimation de l'attitude afin de tenir compte d'autres types de mesures complémentaires telle que la vitesse linéaire du mouvement. Cette mesure peut être assurée par un module GPS ou un capteur de vitesse et nous permettra de concevoir un couplage GPS/INS afin d'améliorer les estimations de l'attitude (Martin et Salaün, 2008b ; Hua, 2010). Il devient possible dans ce cas d'estimer des mouvements (de l'animal ou tout autre mobile) plus accélérés et sur des périodes temporelles plus longues. Une autre mesure complémentaire alternative pourrait être également obtenue d'un capteur visuel. Ces pistes de recherches seront ouvertes prochainement et constitueront un prolongement pour un futur travail qui démarrera probablement l'année prochaine.

- Il nous semble aussi intéressant d'adapter les structures des approches développées pour tenir compte d'une défaillance probable (perturbation magnétique) sur les magnétomètres. Dans ce cadre, nous proposons de concevoir une approche de diagnostic de ces défauts par le biais d'une technique d'observation. En cas de détection d'une anomalie magnétique, il devient nécessaire de concevoir une méthode de fusion capable de reconstruire le quaternion sans avoir recours aux magnétomètres.

- Au cours des expérimentations réalisées dans le chapitre 4, nous avons comparé nos résultats d'estimation de l'attitude à ceux issus de la *MTi-G*, considérée comme référence. A notre avis, bien que nous ayons obtenu de petites différences au niveau des estimations du quaternion ou des angles d'Euler par rapport aux résultats fournis par l'algorithme interne de la *MTi-G*, il reste plus judicieux de comparer nos résultats d'estimation de l'attitude avec un véritable étalon. C'est dans cette directive que nous avons récemment entamé des tests de validation et de comparaison avec un robot manipulateur *IRB 2400* de la compagnie *ABB Group* (ABB Group, 2010) chez *PSA Peugeot Citroën* à Metz. Ce robot permet de fournir l'évolution de l'attitude de la tête sous forme de quaternion et par conséquent il est possible d'obtenir une référence de comparaison. Les tests préliminaires réalisés dans le cas de mouvements statiques et quasi-statiques (déplacement de la tête du robot sur un plan horizontal avec des vitesses linéaires variables) nous ont fourni des résultats satisfaisants avec une erreur d'estimation du quaternion faible comme l'indique la figure E.2 (b) en annexe E.1. Par ailleurs, il reste à réaliser des phases de tests lors de mouvements complexes et plus rapides avec le robot afin d'évaluer la précision de nos approches d'estimation.

- Une autre piste de recherche envisageable serait de concevoir un réseau de capteurs entre les animaux portant les *loggers*. Cette idée pourrait apporter des solutions à plusieurs problématiques en matière d'aspects *software* et *hardware* du *logger* telles que :

- Remédier au problème d'insuffisance de mémoire de données en envoyant les informations à d'autres *loggers* qui peuvent être dédiés uniquement au stockage de mesures des capteurs.

- Si nous voulons obtenir une estimation de l'attitude en temps réel, il sera nécessaire d'embarquer l'algorithme sur le microcontrôleur du bio-logger. Par ailleurs, un des problèmes majeurs en *Bio-logging* concerne l'autonomie encore faible des *loggers* pour

assurer l'ensemble des tâches de lecture, de calcul et d'enregistrement. L'idée est d'envoyer les mesures issues des capteurs vers un autre *logger* ayant pour tâche unique de calculer l'attitude.

Nous avons préféré orienter les perspectives que sur les applications considérées dans ce travail. Mais il n'empêche que les pistes abordées peuvent tout autant trouver d'autres domaines d'application tels que la robotique de service ou militaire par exemple.

A. 1. Les principaux systèmes de coordonnées utilisés en navigation

Toute mesure physique est la valeur d'une quantité relative entre deux systèmes de référence. Pour mieux comprendre les équations de navigation, nous présentons dans la suite de cette annexe les principaux systèmes de référence utilisés (Grewal *et al.*, 2001). Ce sont en effet de vrais objets physiques qui sont distingués par leur état de mouvement relatif de translation ou de rotation.

♦ Le système lié au corps rigide (B) (Body frame)

Ce système est lié au corps rigide (le référentiel propre au mobile). Nous considérons qu'il coïncide avec celui du capteur inertiel (Grewal *et al.*, 2001).

♦ Le système navigation (N) (Navigation frame)

Ce système de coordonnées est défini dans le plan tangent local LTP, son origine est toujours confondue avec celle du corps rigide et son plan formé par X_N et Y_N est tangent à l'ellipsoïde terrestre (Farrell et Barth, 1998 ; Farrell, 2008). Il existe deux conventions des systèmes LTP en navigation, NED et ENU :

NED : North-East-Down (X_N est dirigé vers le nord magnétique local, Y_N est dirigé vers l'Est et Z_N suit la même direction que celle de la pesanteur g).

ENU : East-North-Up (X_N est dirigé vers l'Est, Y_N est dirigé vers le nord magnétique local, et Z_N est dirigé dans le sens opposé à celui de la pesanteur g).

♦ Le système inertiel (I) (ECI-Earth Centred Inertial) (Figure A.1)

C'est un système de coordonnées dans lequel les lois de Newton relatives au mouvement sont valables. L'origine de ce système est le centre de masse de la terre mais il ne suit pas la rotation de la terre (Farrell, 2008 ; Titterton et Weston, 2004). Le système

de coordonnées correspondant est un système cartésien dont les axes sont orientés vers les directions suivantes :

Axe- X_I : dirigé vers le *Vernal Équinoxe* (étoile distante).

Axe- Z_I : dirigé vers le pôle nord.

Axe- Y_I : suivant la direction permettant de compléter le repère direct (dans le plan équatorial).

♦ Le système terre (E) (ECEF-Earth Centred Earth Fixed) (Figure A.1)

Ce système de coordonnées suit la rotation de la terre et son origine est commune avec système de coordonnées inertiel I (Farrell, 2008 ; Titterton et Weston, 2004). Les axes de ce référentiel sont orientés vers les directions suivantes :

Axe- X_E : dirigé vers l'intersection du méridien de Greenwich (longitude=0) et l'équateur (latitude=0).

Axe- Z_E : dirigé vers le pôle nord (suivant le vecteur de rotation terrestre).

Axe- Y_E : suivant la direction permettant de compléter le repère direct.

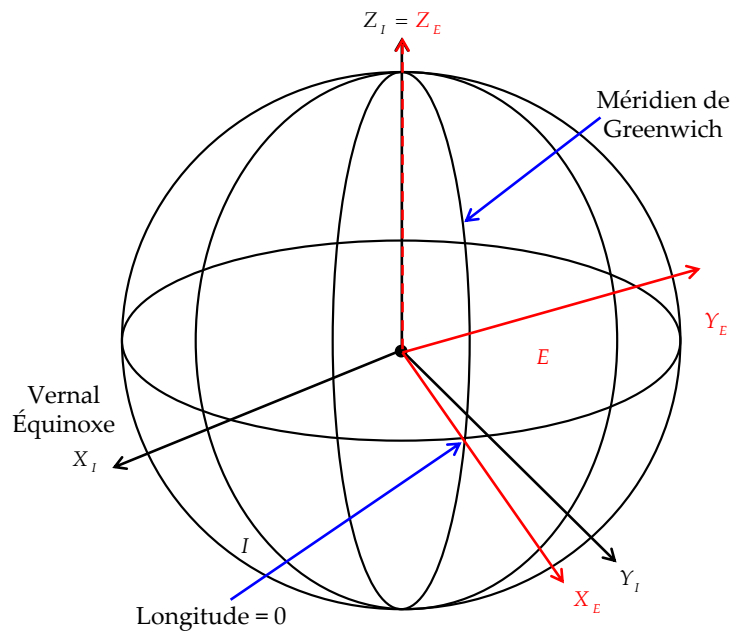


Fig. A.1. Systèmes de coordonnées ECI (I) et ECEF (E)

A. 2. Les paramètres de Rodrigues modifiés

♦ Définition

Lors de la présentation des paramètres de Rodrigues, nous avons observé une singularité pour $\zeta = \pm\pi$, ce qui laisse le vecteur de Gibbs \vec{r} indéfini. Pour remédier à ce problème, une possibilité est d'utiliser un autre paramètre, appelé paramètre de Rodrigues modifié défini dans (Marandi et Modi, 1987) par :

$$\vec{s} = \frac{1}{1 + q_0} q_{vect} = \hat{e} \tan\left(\frac{\zeta}{4}\right) \quad (A.1)$$

Le vecteur de Gibbs modifié est de dimension 3 et peut être défini par :

$$\vec{s} = [s_1 \quad s_2 \quad s_3]^T \quad (A.2)$$

♦ Propriétés essentielles des paramètres de Rodrigues modifiés

La matrice de rotation M_N^B peut être définie en termes de paramètres de Rodrigues modifiés par (Schaub et Junkins, 1996) :

$$M_N^B(\vec{s}) = I_{3 \times 3} - \frac{4(1 - \vec{s}^T \vec{s})}{(\vec{s}^T \vec{s} + 1)^2} [\vec{s}^\times] + \frac{8}{(\vec{s}^T \vec{s} + 1)^2} [\vec{s}^\times]^2 \quad (A.3)$$

où $[\vec{s}^\times]$ est le tenseur antisymétrique défini dans (1.19).

Finalement, la matrice de rotation $M_N^B(\vec{s})$ peut prendre la forme suivante :

$$M_N^B(\vec{s}) = \frac{1}{(1 + \vec{s}^T \vec{s})^2} \begin{bmatrix} 4(s_1^2 - s_2^2 - s_3^2) + (1 - \vec{s}^T \vec{s})^2 & 8s_1s_2 + 4s_3(1 - \vec{s}^T \vec{s}) & 8s_1s_3 - 4s_2(1 - \vec{s}^T \vec{s}) \\ 8s_1s_2 - 4s_3(1 - \vec{s}^T \vec{s}) & 4(-s_1^2 + s_2^2 - s_3^2) + (1 - \vec{s}^T \vec{s})^2 & 8s_2s_3 + 4s_1(1 - \vec{s}^T \vec{s}) \\ 8s_1s_3 + 4s_2(1 - \vec{s}^T \vec{s}) & 8s_2s_3 - 4s_1(1 - \vec{s}^T \vec{s}) & 4(-s_1^2 - s_2^2 + s_3^2) + (1 - \vec{s}^T \vec{s})^2 \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

L'équation (A.1) montre aussi que les paramètres de Rodrigues modifiés possèdent une singularité pour $\zeta = \pm 2\pi$ (Schaub et Junkins, 1996).

♦ Equation cinématique correspondante

L'équation cinématique en termes de paramètres de Rodrigues modifiés peut prendre la forme suivante (Guerrero-Castellanos, 2008) :

$$\dot{s}_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1(1 - s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)}{2} - \omega_2s_3 + \omega_3s_2 + s_1 \sum_{i=1}^3 s_i \omega_i \right) \quad (A.5)$$

$$\dot{s}_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_2(1 - s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)}{2} - \omega_3s_1 + \omega_1s_3 + s_2 \sum_{i=1}^3 s_i \omega_i \right) \quad (A.6)$$

$$\dot{s}_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_3 (1 - s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)}{2} - \omega_1 s_2 + \omega_2 s_1 + s_3 \sum_{i=1}^3 s_i \omega_i \right) \quad (\text{A.7})$$

où s_i sont les paramètres de Rodrigues modifiés et ω_i les composantes du vecteur vitesse angulaire.

A. 3. Exemples de capteurs inertiels et magnétiques MEMS

Nous présentons dans les tableaux A.1, A.2 et A.3 des exemples industriels de capteurs inertiels et magnétiques MEMS (accéléromètre triaxial, gyromètre triaxial et magnétomètre triaxial) dédiés à des applications de navigation et d'estimation de l'attitude.

Firme/référence	Taille	Etendue de mesure	Courant	Bruit	Bande passante
Bosch / BMA150 Bosch / SMB380	$3 \times 3 \times 0.9 \text{ mm}$	$\pm 2g$	$200 \mu A$	0.5 mg RMS	1500 Hz
Freescall / MMA7456L	$3 \times 5 \times 1 \text{ mm}$	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g$	$400 \mu A$	-	62.5 ou 125 Hz
STMicroelectronics / LIS331DLH	$3 \times 3 \times 1 \text{ mm}$	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g$	$250 \mu A$	218 mg RMS	25 , 50 , 200 ou 500 Hz
VTI Technologies / SCA3100-D04	$7.6 \times 8.6 \times 3.3 \text{ mm}$	$\pm 2g$	$300 \mu A$	5 mg RMS	55 Hz

Tab. A.1. Caractéristiques de quelques accéléromètres MEMS du marché

Firme/référence	Taille	Etendue de mesure	Courant	Bruit	Bande passante
Analog Devices / ADIS16354	$23 \times 23 \times 23 \text{ mm}$	$\pm 300^\circ / s$	33 mA	$0.05^\circ / s / \text{RMS}$	350 Hz
STMicroelectronics / L3G4200D	$4 \times 4 \times 1 \text{ mm}$	$\pm 250^\circ / s$ $\pm 500^\circ / s$	6.1 mA	$0.03^\circ / s / \text{RMS}$	50 , 100 , 200 ou 400 Hz
Invensense / ITG3200	$4 \times 4 \times 0.9 \text{ mm}$	$\pm 2000^\circ / s$	6.5 mA	-	-
STMicroelectronics / LYPR540AH	$4.4 \times 7.5 \times 1.1 \text{ mm}$	$\pm 400^\circ / s$	10.8 mA	$0.02^\circ / s / \text{RMS}$	140 Hz

Tab. A.2. Caractéristiques de quelques gyromètres MEMS du marché

Firme/référence	Taille	Etendue de mesure	Courant	Bruit	Bande passante
<i>PNI Sensor Corporation /MicroMag3</i>	$25.4 \times 25.4 \times 19 \text{ mm}$	$\pm 11 \text{ Gauss}$	$500 \mu\text{A}$	-	-
<i>YAMAHA / YAS529</i>	$2 \times 2 \times 1 \text{ mm}$	$\pm 3 \text{ Gauss}$	$400 \mu\text{A}$	-	100Hz
<i>Honeywell / HMC2003</i>	$25.91 \times 18.03 \times 10.92 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ Gauss}$	20mA	2.2GaussRMS	1KHz
<i>STMicroelectronics / LSM303DLH</i>	$5 \times 5 \times 1 \text{ mm}$	$\pm 8.1 \text{ Gauss}$	0.83mA	-	25 , 50 , 200 ou 500Hz

Tab. A.3. Caractéristiques de quelques magnétomètres MEMS du marché

A. 4. Principaux systèmes inertiels du marché

Nous regroupons dans les tableaux A.4, A.5 et A.6 des exemples industriels de systèmes inertiels récents. Le tableau A.4 est réservé aux IMU, le tableau A.5 aux AHRS et le tableau A.6 aux INS. Les détails techniques de chaque référence existent sur le site web de chaque compagnie.

Constructeurs	Références
<i>InterSense (Intersense, 2010)</i>	Navchip
<i>Memsense (Memsense, 2010)</i>	nIMU / μ IMU / H3IMU / MAG3 / AccelRate3D
<i>Crossbow Technology (Crossbow Technology, 2010)</i>	IMU440 / IMU800 / IMU 700
<i>Watson Industries (Watson Industries, 2010)</i>	DMS-E604 / DMS-S605

Tab. A.4. Exemples d'unités de mesures inertiels (IMU)

Constructeurs	Références
<i>InterSense (Intersense, 2010)</i>	InertiaCube2+ / InertiaCube3
<i>Xsens Technologies (Xsens Technologies, 2010)</i>	MTi / MTx
<i>MicroStrain (Microstrain, 2010)</i>	3DM-GX1 / 3DM-GX2 / 3DM-GX3-25
<i>Sbg systems (Sbg systems, 2010)</i>	IG-500A
<i>GLI Interactive LLC (GLI Interactive LLC, 2010)</i>	MotionNode
<i>Waston Industries (Waston Industries, 2010)</i>	AHRS-S305 / AHRS-E304
<i>Navionex (Navionex, 2010)</i>	GO AHRS / Nano AHRS

<i>Crossbow Technology (Crossbow Technology, 2010)</i>	AHRS 510 / AHRS 500 / AHRS 440
--	--------------------------------

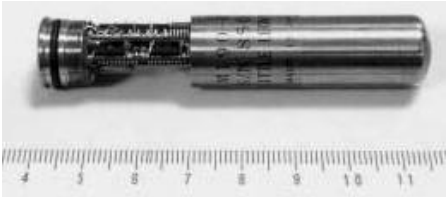
Tab. A.5. Exemples de centrales d'attitude (AHRS)

Constructeurs	Références
<i>Xsens Technologies (Xsens Technologies, 2010)</i>	MTi-G
<i>Sbg systems (Sbg systems, 2010)</i>	IG-500N
<i>Microbotics (Microbotics, 2010)</i>	MIDG II
<i>Crossbow Technology (Crossbow Technology, 2010)</i>	NAV 420 / NAV 440



Tab. A.6. Exemples de centrales inertielles (INS)

B.1. Exemples de bio-loggers du marché

Nous présentons quelques exemples de bio-loggers du marché qui ont été déployés sur divers animaux et qui ont servi dans différentes études scientifiques. Le but est de permettre au lecteur de parcourir brièvement l'éventail actuel des principaux capteurs, de l'architecture des différents types de bio-loggers et leurs possibilités de mesures.

Bio-loggers	Description
<i>Little Leonardo</i>	<p>Depuis 1992, la compagnie <i>Little Leonardo</i> développe en collaboration avec <i>Marine Micro Technology</i> des bio-loggers digitaux de qualité et performance reconnues à l'échelle internationale. Leur architecture de base est composée essentiellement d'un microcontrôleur, de convertisseurs analogiques/numériques, d'une horloge temps réel RTC⁵³, de filtres analogiques, d'une batterie, d'une mémoire flash. Des capteurs variés sont ajoutés selon l'application et les besoins de la recherche. Nous distinguons plusieurs modèles de bio-loggers conçus par cette compagnie tels que NIPR-200, W190L-PD2GT, W380TL-3MPDT, M190-DT (Figure B.1). Une étude détaillée des <i>loggers</i> de cette compagnie existe dans (Muramoto <i>et al.</i>, 2004).</p>  <p>Fig. B.1. Bio-logger de la compagnie <i>Little Leonardo</i>, modèle M190-DT</p>

⁵³ **RTC** : Real Time Clock

Wildlife	<p><i>Wildlife Computers</i> est une autre compagnie innovatrice en matière de conception et fabrication des systèmes électroniques sophistiqués depuis 1986. Ses produits sont destinés à l'étude de la faune et aux recherches écologiques sur les animaux marins (manchots, tortues, phoques, les gros poissons, etc.). Cette entreprise offre un large éventail de bio-loggers comportant une variété de capteurs de profondeur (de pression), de température, d'humidité, de lumière, de vitesse, etc. Des modules GPS et des balises ARGOS peuvent être associés à ces bio-loggers. Plusieurs modèles de bio-loggers ont déjà été déployés tels que : SPOT (Figure B.2 (a)), SPLASH, Mk9, Mk10, Mk10-A (Figure B.2 (b)), Mk10-AF, Mk10-AFB, Mk10-F, Mk10-AL, Mk10-L (Figure B.2 (c)), Mk10-PAT, MiniPAT, STP et AC1. Une étude détaillée de ces instruments électroniques existe sur le site web de la compagnie (Wildlife computers, 2010).</p> <div data-bbox="480 712 1321 981">  <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> (a) (b) (c) </div> </div> <p>Fig. B.2. Bio-loggers de la compagnie <i>Wildlife Computers</i> (a) SPOT – (b) Mk10-A – (c) Mk10-L</p>
Sirtrack	<p>L'entreprise <i>Sirtrack</i> est spécialisée dans la conception et la fabrication sur mesure des équipements de suivi de la faune depuis 1986 et propose des solutions pour répondre aux demandes des chercheurs, des écologistes et des gestionnaires de la faune et leurs exigences d'étude. Les solutions proposées par cette compagnie sont très variées et reposent sur des techniques de localisation par transmission VHF, GPS, et ARGOS (Figure B.3). Une étude détaillée de ces instruments électroniques existe sur le site web de la compagnie (Sirtrack, 2010).</p> <div data-bbox="413 1391 1388 1697">  <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> (a) (b) (c) </div> </div> <p>Fig. B.3. Bio-loggers <i>Sirtrack</i> (a) Transmission VHF (b) Transmission GPS (c) Transmission ARGOS</p>
DTAG	<p>Un autre bio-logger, appelé <i>DTAG</i>, a été développé dans (Johnson et Tyack, 2003) (Figure B.4). Ce système a été conçu pour suivre le comportement des mammifères marins (les baleines) et leur réponse aux sons anthropiques. Il permet en même temps de reconstruire leurs mouvements pendant les longues plongées. Ce bio-logger comprend un accéléromètre triaxial, un magnétomètre triaxial, un capteur de pression, un capteur de température, un hydrophone pour</p>

	<p>mesurer le bruit acoustique, un DSP⁵⁴ qui combine les données provenant des capteurs et de l'hydrophone, une mémoire flash de 3 Gb pour stocker les mesures provenant des capteurs, une batterie Li-Ion pour alimenter le système en énergie et une couche de résine pour protéger le <i>logger</i> des fortes pressions.</p> <div data-bbox="443 387 1355 627" data-label="Image"> </div> <p>Fig. B.4. Le bio-logger DTAG</p>
Daily Diary	<p>Récemment, le bio-logger, appelé <i>Daily Diary</i>, a été proposé dans (Wilson <i>et al.</i>, 2008) (Figure B.5). Ce prototype a été utilisé sur des espèces animales différentes telles que les manchots, les blaireaux, les chiens, les chevaux, les cigognes, etc. Il est destiné à enregistrer le mouvement, le comportement, les dépenses énergétiques de l'animal ainsi que les caractéristiques de son environnement. Ce bio-logger peut enregistrer les mesures durant une période variable (entre 1 <i>jour</i> et 1 <i>an</i>) selon le taux d'échantillonnage des capteurs et la durée de la batterie. Ce bio-logger contient un accéléromètre triaxial, un magnétomètre triaxial, un capteur de pression, un capteur de vitesse, deux capteurs de température (intérieure et extérieure), un capteur de lumière, un capteur d'humidité, un module GPS, une batterie lithium 3.6 V et une mémoire flash de 1 Gb.</p> <div data-bbox="678 1158 1112 1473" data-label="Image"> </div> <p>Fig. B.5. Le bio-logger <i>Daily Diary</i></p>
MAMMARK	<p>Cette génération récente de bio-logger (Figure B.6), appelée <i>MAMMARK</i>, a été conçue pour étudier le comportement des éléphants de mer pendant leurs phases de plongée (Elkaim <i>et al.</i>, 2006). Généralement ce bio-logger est attaché à la tête ou le dos de l'animal et une fois activé, il peut enregistrer les informations sur une période dépassant les 20 <i>jours</i>. Il inclut un accéléromètre triaxial et un magnétomètre triaxial pour déduire l'orientation de l'animal, un capteur de pression pour connaître la profondeur de plongée de l'animal, un capteur de vitesse pour calculer la position de l'animal, un capteur de salinité et un autre de température pour étudier l'environnement de l'animal, une batterie solaire pour alimenter les systèmes, un microcontrôleur pour gérer l'ensemble des données, des convertisseurs analogiques/digitaux pour numériser les mesures analogiques</p>

⁵⁴ **DSP** : Digital Signal Processing

provenant des capteurs, un module GPS pour enregistrer les positions de l'animal lorsqu'il remonte à la surface de l'eau, une mémoire **SD**⁵⁵ ou **MMC**⁵⁶ de 4 Gb pour le stockage de données et un module radio fréquence pour localiser le bio-logger lorsque l'animal revient sur terre.

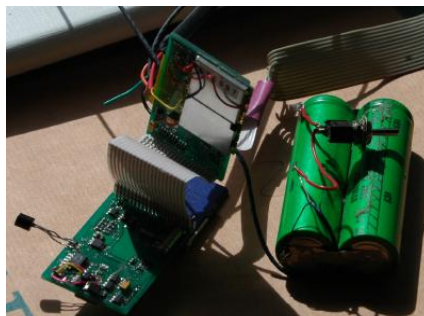


Fig. B.6. Bio-logger *MAMMARK*

B. 2. Micro-loggers conçus à l'IPHC

Le tableau B.1 regroupe l'ensemble des modèles de micro-loggers développés à l'IPHC. Nous précisons pour chacun la nature des capteurs qui le constituent.

Nom	Capteurs digitaux de température et de pression (20 bars)	Capteur analogique de pression (200 bars)	Capteur analogique de luminosité (10 bits)	Capteur digital de température externe	Mémoire flash (1, 8 ou 16 Mo)	Mémoire micro SD (1 ou 2 Go)
<i>PT20L_8M</i>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	
<i>PT20T2_8M</i>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/> × 2	<input checked="" type="checkbox"/>	
<i>PT20T2_8M_CC</i>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/> × 2	<input checked="" type="checkbox"/>	
<i>PT20T2_SD_CC</i>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/> × 2		<input checked="" type="checkbox"/>
<i>PT20P200L_SD</i> « Mirette Roses »	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>
<i>LuL</i>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	

Tab. B.1. Modèles de micro-loggers développés à l'IPHC

⁵⁵ **SD** : Secure Digital

⁵⁶ **MMC** : Multi Media Card

B. 3. Macro-loggers conçus à l'IPHC

Une description générale des modèles de macro-loggers développés au sein de l'IPHC est donnée dans le tableau B.2.

Macro-loggers	Caractéristiques et utilisations
<i>Macro GPS Mirette</i>	Il comporte 8 capteurs tels que : des capteurs de température extérieure et intérieure, un capteur de pression (20 bars), un capteur de tension d'alimentation du microcontrôleur, un capteur de luminosité, un capteur de pression (200 bars), un capteur de présence eau et un récepteur GPS avec une alimentation séparée. Ce macro-logger est utilisé sur les tortues marines (luth) en Guyane.
<i>Macro FC M et MacroLoggerGene</i>	Il comporte 2 capteurs de pression 20 et 50 bars, un accéléromètre 3 axes $\pm 2 g$, un ECG, un capteur de luminosité et un capteur présence eau. Ce logger est déployé sur les manchots.
<i>Macro FC B - 2G - 1.0</i>	Ce logger est déployé sur les blaireaux et comporte un altimètre, un accéléromètre 3 axes $\pm 2 g$, un ECG, un capteur de luminosité et un capteur présence eau.
<i>Macro FC M - 1.1</i>	Ce logger est identique au macro FC M mais avec un capteur PT30, un capteur de luminosité, un capteur présence eau (option), un accéléromètre 3 axes $\pm 3 g$ et un hardware de la sonde ECG opérationnel.
<i>Macro FC B - 3G - 1.1</i>	Ce logger est identique au macro FC B - 2G mais avec un accéléromètre $\pm 3 g$. Ce logger est utilisé sur les blaireaux.
<i>Macro FC B - Sesam</i>	Ce capteur est utilisé pour détecter le passage de blaireaux dans leurs terriers.
<i>Macro IPEV</i>	Son architecture est identique à celle du FC M - 1.1. Seuls le capteur PT30, le capteur de lumière, Wet-Dry, l'accéléromètre $\pm 3 g$ et les 2 capteurs analogiques sont activés.

Tab. B.2. Modèles de macro-loggers développés à l'IPHC

B. 4. Calcul de l'attitude à partir des mesures issues d'un accéléromètre et d'un magnétomètre

B. 4. 1. Calcul des angles de roulis (roll) et tangage (pitch)

Un accéléromètre triaxial mesure l'accélération gravitationnelle et l'accélération propre lorsqu'il est attaché à un mobile en mouvement.

Lorsque l'accélération propre est négligeable devant l'accélération gravitationnelle (cas statique ou quasi-statique), les mesures de l'accéléromètre f représentent uniquement les

composantes du vecteur gravité projeté dans le système de coordonnées mobiles. Il est possible à ce moment de déduire deux angles d'Euler (roulis : φ , tangage : θ) en utilisant les formules suivantes :

$$\varphi = \begin{cases} \text{atan2}(-f_y, -f_z) & \text{pour les accélérations gravitationnelles négatives} \\ \text{atan2}(f_y, f_z) & \text{pour les accélérations gravitationnelles positives} \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

$$\theta = \begin{cases} \text{asin}\left(\frac{f_x}{|f|}\right) & \text{pour les accélérations gravitationnelles négatives} \\ \text{asin}\left(\frac{-f_x}{|f|}\right) & \text{pour les accélérations gravitationnelles positives} \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

En effet nous obtenons pour chaque angle deux formules puisque le choix d'une accélération gravitationnelle positive ou négative dépend parfaitement du constructeur de l'accéléromètre.

B. 4. 2. Calcul de l'angle de lacet (yaw)

Dans le cas où les angles de roulis et de tangage sont réellement proches de zéro, il est possible d'utiliser les mesures du magnétomètre h dans (B.3) pour calculer l'angle de lacet (Ladetto, 2003) :

$$\psi = \text{atan2}(h_y, h_x) \quad (\text{B.3})$$

Dans le cas contraire, nous pouvons calculer l'angle de lacet en utilisant les angles de roulis et de tangage déjà connus (Zhu *et al.*, 2007) :

$$\psi = \text{atan2}\left((h_z \sin \varphi - h_y \cos \varphi), (h_x \cos \theta + (h_y \sin \varphi + h_z \cos \varphi) \sin \theta)\right) \quad (\text{B.4})$$

C. 1. Notions sur le filtrage complémentaire

Le filtrage complémentaire est une théorie qui est basée sur l'utilisation de multiples données indépendantes et bruitées du même signal. Cette technique a été profondément étudiée dans de nombreux travaux tels que (Wiener, 1949 ; Brown et Hwang, 1997). Un signal inconnu peut être estimé en utilisant des mesures bruitées à partir d'un ou plusieurs capteurs dont leurs informations sont situées naturellement dans des bandes de fréquences distinctes mais complémentaires (Higgins, 1975). La technique de filtrage complémentaire explore la redondance d'informations des différents capteurs dans le but de rejeter les perturbations présentes dans les mesures pour fournir le signal estimé.

Si les mesures issues de chaque capteur ont des caractéristiques fréquentielles et spectrales complémentaires, les fonctions de transfert associées peuvent être choisies de manière à minimiser l'erreur d'estimation. La condition générale est que l'une des fonctions de transfert complète la somme des autres. Ainsi, pour n mesures d'un signal considéré, nous avons l'équation suivante :

$$1 - T_1(s) - T_2(s) - \dots - T_{n-1}(s) = T_n(s) \quad (\text{C.1})$$

avec s est la variable de Laplace.

Une structure simple d'un filtre complémentaire comporte deux bruits qui contaminent le signal (Figure C.1).

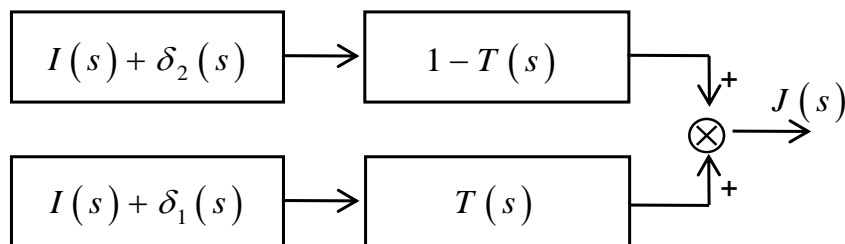


Fig. C.1. Structure usuelle d'un filtre complémentaire

Si δ_1 est un bruit de haute fréquence et δ_2 est un bruit de basse fréquence, alors les deux sources de bruit ont des caractéristiques spectrales complémentaires. Cela revient à dire que $I(s) + \delta_1(s)$ est prédominante à haute fréquence et $I(s) + \delta_2(s)$ est prédominante à basse fréquence comme cela est illustré dans la figure C.2 (Pflimlin, 2006). De même, si $T(s)$ est choisie comme un filtre passe-bas, alors $1 - T(s)$ constitue un filtre passe-haut et les deux signaux de bruit sont atténués. Ainsi, l'aspect complémentaire du filtre proviendra de l'équation (C.1).

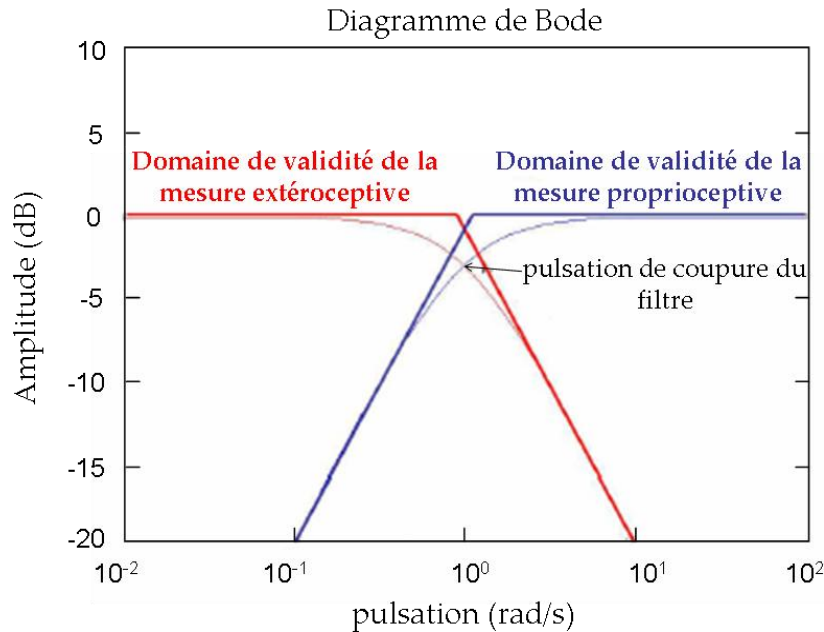


Fig. C.2. Diagramme de Bode en amplitude des transferts $T(s)$ et $1 - T(s)$ du filtre complémentaire lorsque (C.1) est vérifiée (Pflimlin, 2006)

Le problème d'estimation de l'attitude consiste à trouver un compromis entre précision à court terme, donnée par intégration de mesures issues de gyroscope, et précision à long terme, donnée par les mesures d'un capteur d'attitude (accéléromètre). Les techniques de filtrage complémentaire permettant une interprétation dans le domaine fréquentiel et fournissant une règle simple pour le réglage du filtre, offrent un moyen direct pour réaliser ce compromis (Mahony *et al.*, 2008).

D. 1. Relations mathématiques entre les quaternions et les angles d'Euler

L'interprétation physique des quaternions est moins intuitive que celle des angles d'Euler. Pour cette raison, il est souvent plus convenable d'exprimer les quaternions sous forme d'angles d'Euler en utilisant les formules de passage énoncées dans (Phillips *et al.*, 2001). Les relations de passage entre un quaternion $q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ et les angles d'Euler (roulis : φ , tangage : θ , lacet : ψ) sont exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{Bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{atan2} \left[2(q_0 q_1 + q_2 q_3), (q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2) \right] \\ \text{asin} \left[2(q_0 q_2 - q_1 q_3) \right] \\ \text{atan2} \left[2(q_0 q_3 + q_1 q_2), (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) \right] \end{Bmatrix} \quad (\text{D.1})$$

De même, il est possible d'exprimer le passage inverse entre ces deux formes de représentations de l'attitude par les formules suivantes :

$$\begin{Bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix} = \pm \begin{Bmatrix} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \end{Bmatrix} \quad (\text{D.2})$$

Il faut noter que les deux solutions en quaternion sont valides. Bien évidemment, toute orientation d'un système de coordonnées par rapport à un autre peut être décrite en termes de deux types de rotations (à droite). Par exemple, une rotation à droite de 90° autour de l'axe positif X est équivalente à une rotation à droite de 270° autour de l'axe négatif X. Les deux solutions données dans (D.2) représentent ces deux rotations équivalentes. Souvent, le signe positif est sélectionné.

D. 2. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus avec l'observateur non linéaire additif et l'observateur à modes glissants au cours du mouvement de membre humain

Cette partie regroupe les résultats d'estimation de l'attitude obtenus au cours du mouvement de membre humain. Nous avons choisi de tracer uniquement les erreurs d'estimation sur les angles d'Euler relatives aux approches par observateur non linéaire additif et par observateur à modes glissants. La figure D.1 montre cette erreur en représentant l'évolution de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G*. Cette différence nous renseigne sur la marge d'erreur commise lors de l'estimation des angles d'Euler. De même, la figure D.2 illustre la variation de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G*. Les erreurs obtenues dans ces deux figures ne dépassent pas 3° pour le roulis et le tangage et 4° pour le lacet. Ainsi, nous pouvons conclure que ces deux approches permettent de reconstruire efficacement l'orientation de la main lors des différents mouvements effectués et pour toutes les dynamiques rapides et lentes.

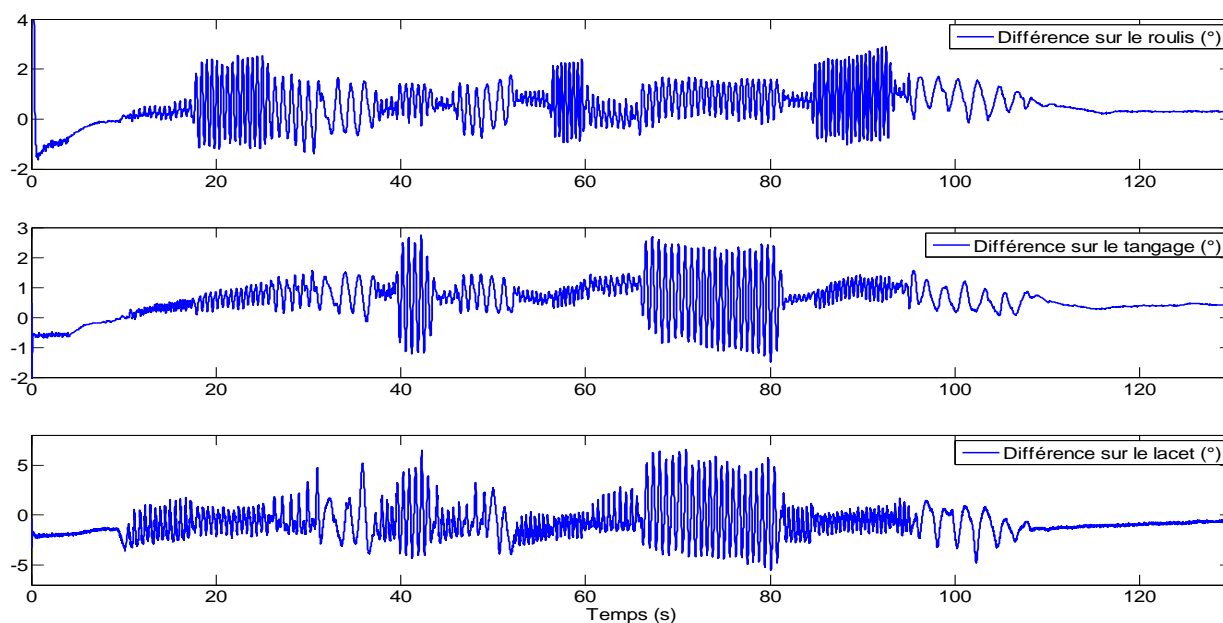


Fig. D.1. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par la main

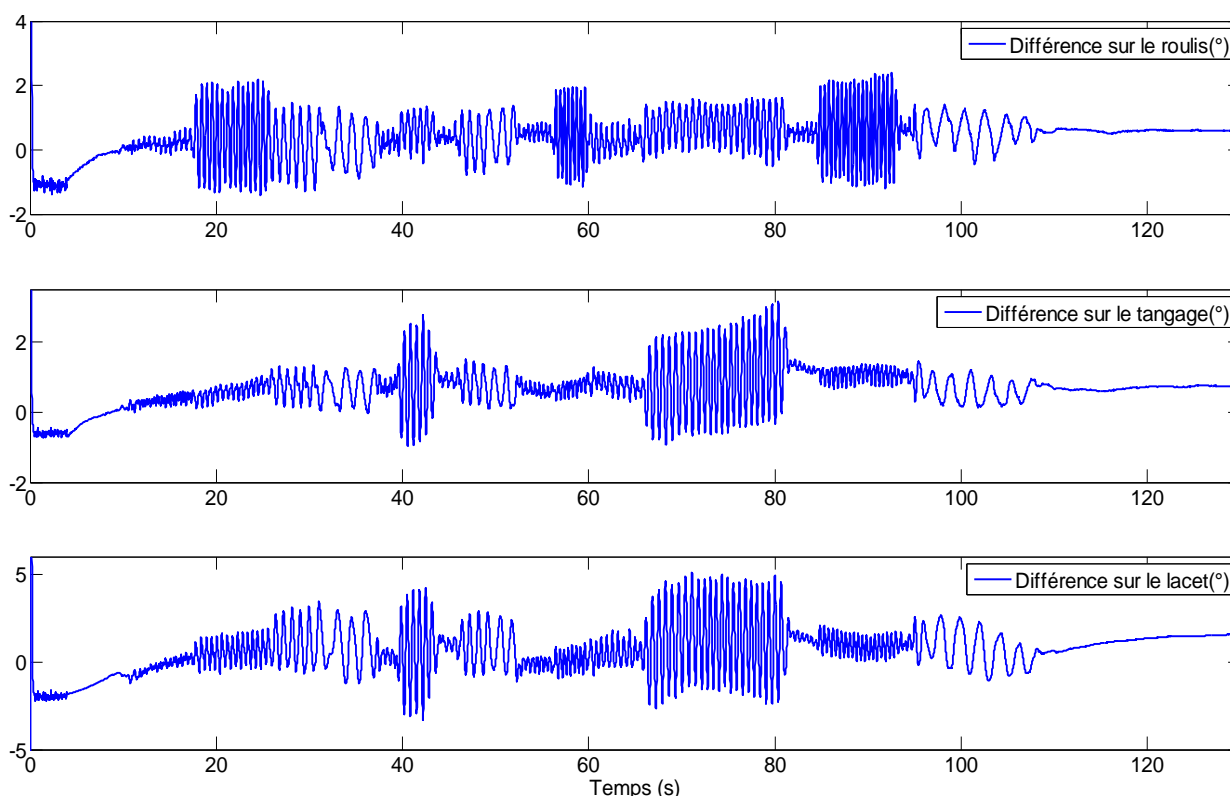


Fig. D.2. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par la main

D. 3. Résultats d'estimation de l'attitude obtenus avec l'observateur non linéaire additif et l'observateur à modes glissants au cours du mouvement d'un animal

Nous présentons dans cette partie les résultats d'estimation de l'attitude obtenus lors du mouvement de deux animaux : le chien et le cheval. Les erreurs d'estimation sur les angles d'Euler relatives aux approches par observateur non linéaire additif et par observateur à modes glissants sont représentées uniquement.

D. 3. 1. Cas du chien

Nous représentons dans la figure D.3 l'évolution de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le chien. De même, la figure D.4 illustre également la variation de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G*. Les erreurs observées dans ces deux figures sont aussi faibles (autour de 4° pour le roulis et le tangage et 5° pour le lacet).

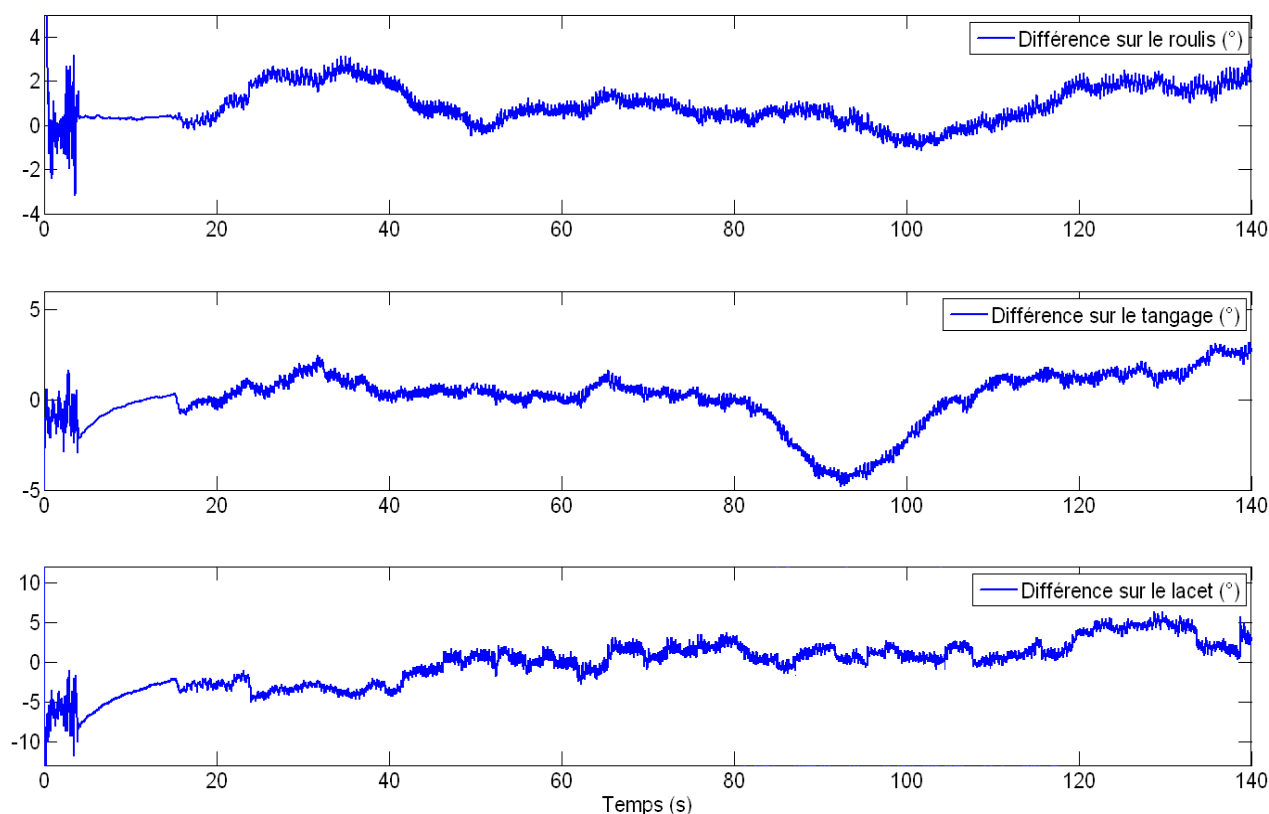


Fig. D.3. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le chien

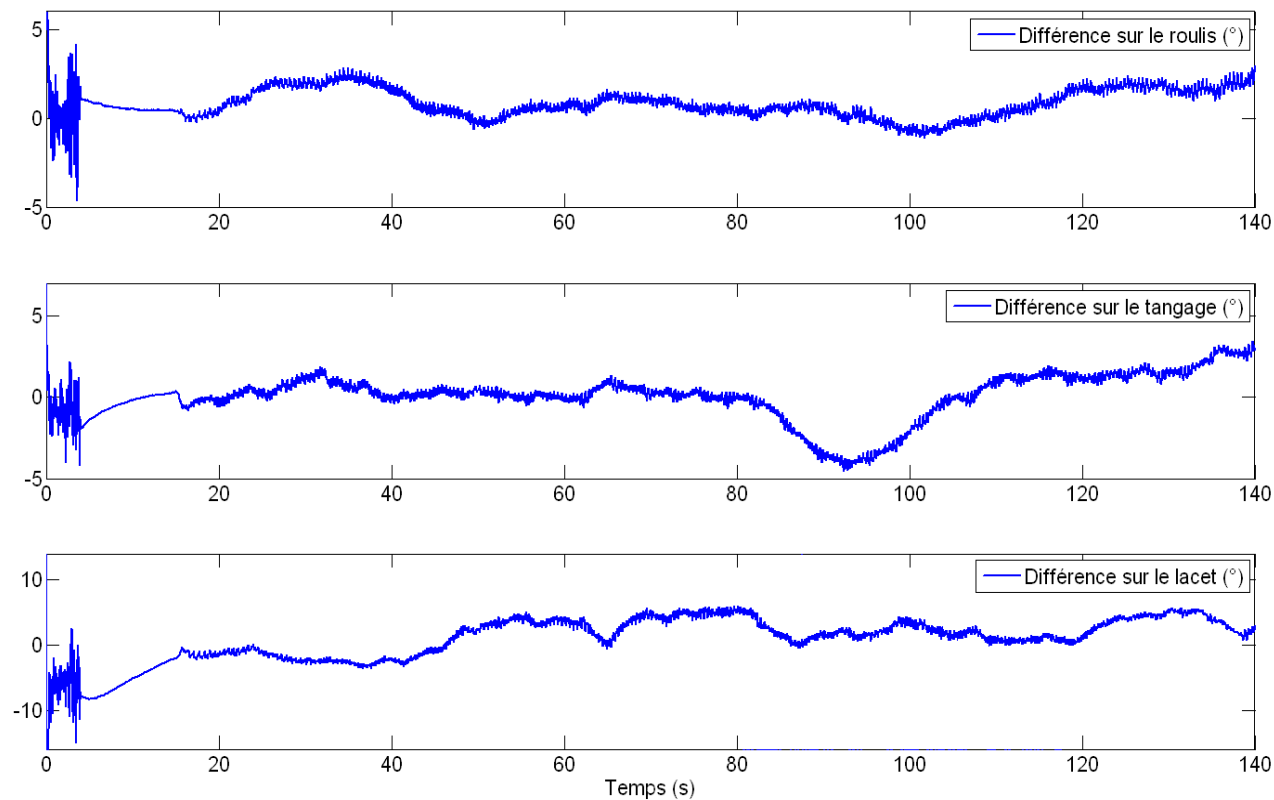


Fig. D.4. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le chien

D. 3. 2. Cas du cheval

La figure D.5 trace l'évolution de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le cheval. La figure D.6 montre également la variation de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G*. Nous remarquons que les erreurs d'estimation de ces angles dans les deux figures sont aussi faibles (autour de 2° pour le roulis et le tangage et 5° pour le lacet).

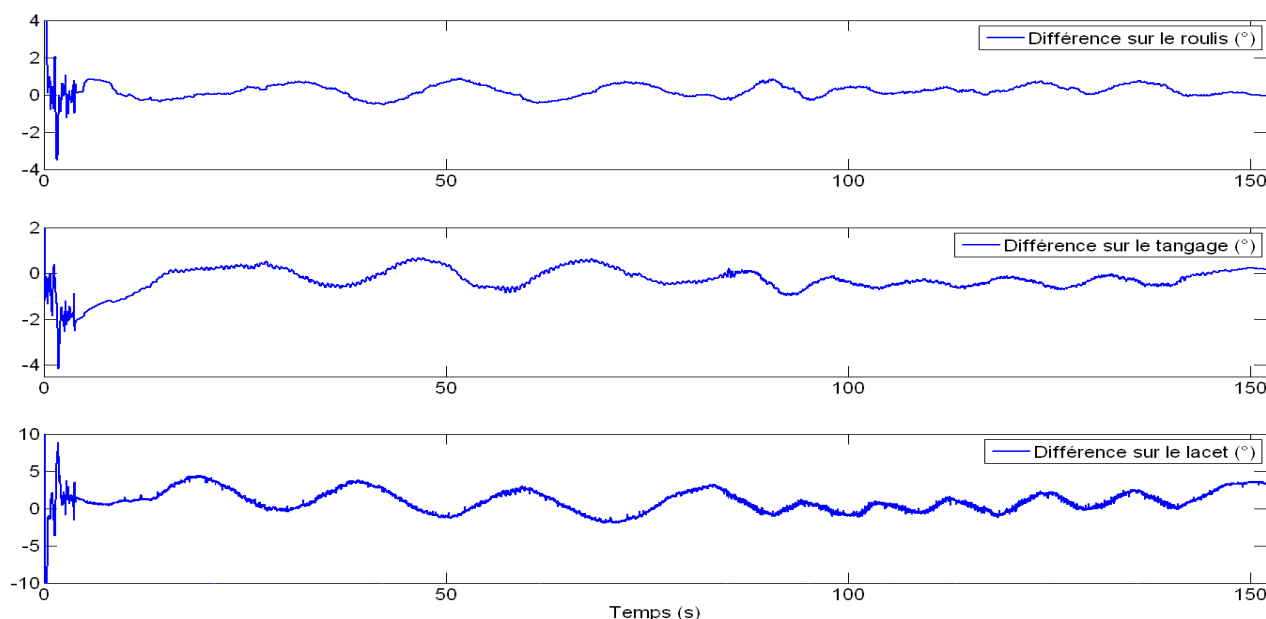


Fig. D.5. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur non linéaire additif et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le cheval

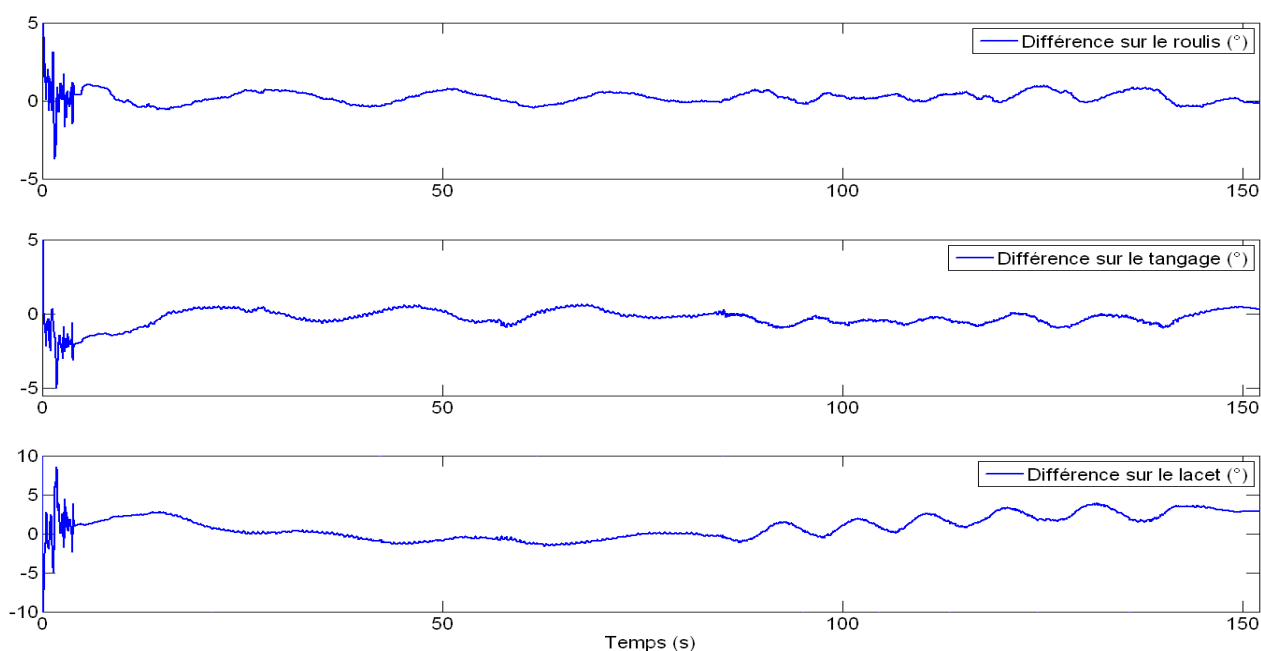


Fig. D.6. Evolution temporelle de la différence entre les angles d'Euler estimés par l'observateur à modes glissants et ceux calculés par la *MTi-G* au cours du mouvement réalisé par le cheval

E. 1. Tests préliminaires de validation avec un robot manipulateur

Nous avons récemment commencé des essais de comparaison avec un robot manipulateur *IRB 2400* de la compagnie *ABB Group* (ABB Group, 2010) chez *PSA Peugeot Citroën* à Metz (figure E.1). Ce robot permet de fournir l'évolution de l'attitude de la tête sous forme de quaternion et par conséquent il est possible d'obtenir une référence de comparaison. Ce robot donne un excellent contrôle de mouvement autour de six axes avec une précision de 0.06 mm . Comme la montre la figure E.1, nous avons attaché la centrale d'attitude *MTi* à une plaque (de longueur environ 40 cm), qui elle même est attachée à la tête du robot. Nous avons considéré deux systèmes de coordonnées mobiles **Tool0** et **T_st_iner** correspondant, respectivement, à la tête du robot et la centrale d'attitude. Ces deux systèmes ont été alignés dans le but d'estimer par la suite l'attitude de la tête du robot. Nous avons programmé un chemin connu où des points d'attitude ont été fixés.

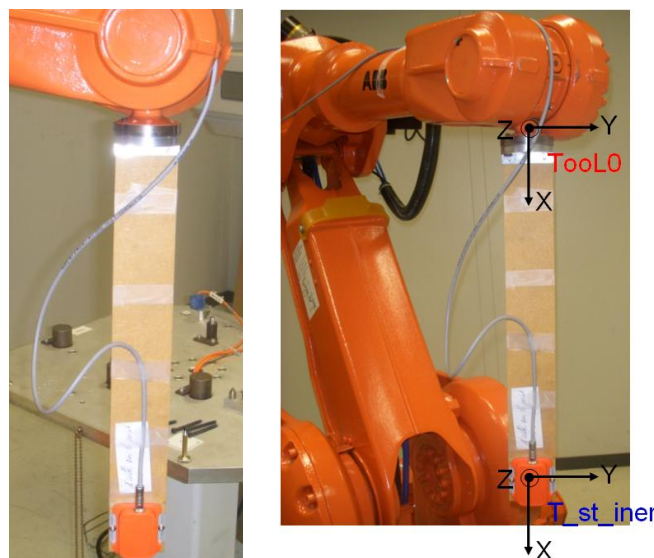


Fig. E.1. Dispositif expérimental : la *MTi* attachée au robot pour enregistrer les mesures inertielles et magnétiques lors du mouvement réalisé par le robot

Ainsi, nous avons programmé de déplacer la tête du robot selon un plan horizontal en suivant une ligne droite. Au cours du déplacement de la tête, nous avons varié sa vitesse de déplacement afin d'introduire des accélérations propres sur les mesures de l'accéléromètre. Nous représentons dans la figure E.2 (a) l'estimation de l'orientation (sous forme de quaternion) de la tête du robot par l'approche basée sur le filtre complémentaire. De même, nous montrons dans cette même figure E.2 (b), l'erreur d'estimation des quatre composants du quaternion. Nous remarquons alors que cette erreur est faible durant le déplacement de la tête du robot. En la représentant en degré, cette erreur ne dépasse pas 5° sur les trois angles d'Euler.

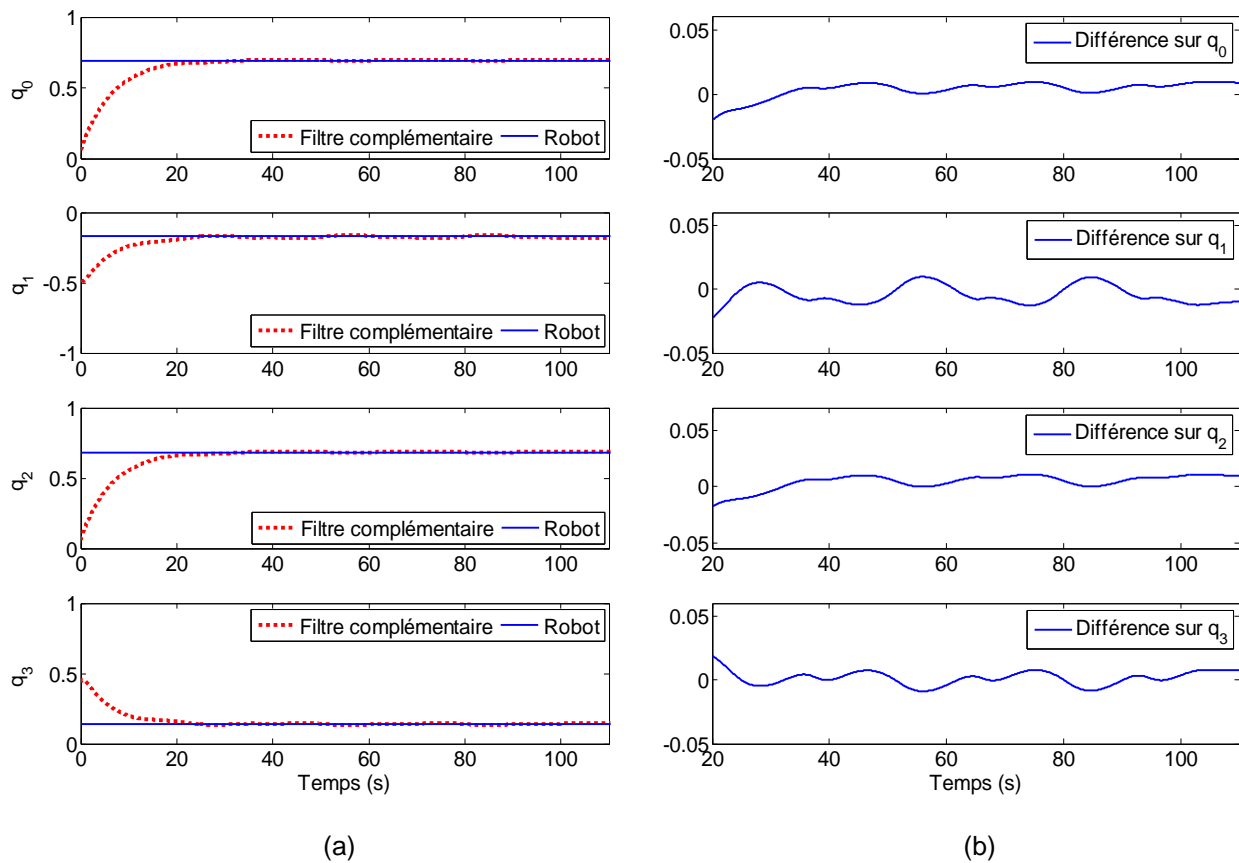


Fig. E.2. (a) Estimation des composantes du quaternion d'attitude au cours du mouvement réalisé par la tête du robot : q (quaternion calculé par le robot (—)), \hat{q} (quaternion estimé par le filtre complémentaire (- -)) - (b) Erreur entre le quaternion estimé par le filtre complémentaire et celui calculé par le robot

Bibliographie

A

ABB Group. (2010). www.abb.com.

Amlaner, C. J., & McDonald, D. W. (1980). *A handbook on biotelemetry and radio tracking*. Oxford, UK: Pergamon Press.

Ang, W. T., Khosla, P. K., & Riviere, C. N. (2004). Kalman filtering for real-time orientation tracking of handheld microsurgical instrument. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, pp. 2574-2580.

Astrosurf. (2010). www.astrosurf.com.

Atmel. (2010). www.atmel.com.

B

Baker, A. L. (1911). *Quaternions as the result of Algebraic Operations*. New York: Van Nostrand.

Bandala, M., & Joyce, M. J. (2008). Tracking of internal organ motion with a six degree-of-freedom MEMS sensor: concept and simulation study. *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 2, p. 024006.

Baraff, D. (1997). An introduction to Physically Based Modeling: Rigid Body I- Unconstrained Rigid Body Dynamics. *SIGGRAPH, Course Notes*.

Bar-Izthack, I. Y., Deutschmann, J., & Markley, F. L. (1991). Quaternion normalization in additive EKF for spacecraft attitude estimation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, New Orleans, LA, AIAA-91-2706.

Batista, P., Silvestre, C., Oliveira, P., & Cardeira, B. (2010). Low-Cost Attitude and Heading Reference System: Filter Design and Experimental Evaluation. *IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska, pp. 2624-2629.
- Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M., & White, N. (2004). *MEMS Mechanical Sensors*. Artech House, Inc.
- Besançon, G. (2007). *Nonlinear Observers and Applications*. Series: Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 363.
- Bijker, J., & Steyn, W. (2008). Kalman filter configurations for a low-cost loosely integrated inertial navigation system on an airship. *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 12, pp. 1509-1518.
- Bodin, C., Benhamou, S., & Poulle, M. L. (2006). What do European badgers (*Meles meles*) know about the spatial organisation of neighbouring groups? *Behavioural Processes*, vol. 72, pp. 84-90.
- Bograd, S. J., Block, B. A., Costa, D. P., & Godley, B. J. (2010). Bio-logging technologies: new tools for conservation. Introduction. *Endangered Species Research*, vol. 10, pp. 1-7.
- Boivin, B. (2004). *Commande numérique d'un gyromètre vibrant*. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, Poitiers, France.
- Bonnabel, S. (2007). Left-invariant extended Kalman filter and attitude estimation. *46th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, USA, pp. 1027-1032.
- Bonnabel, S., Martin, P., & Rouchon, P. (2006). A non-linear symmetry-preserving observer for velocity-aided inertial navigation. *American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 2910-2914.
- Bonnabel, S., Martin, P., & Salaün, E. (2009). Invariant Extended Kalman Filter: theory and application to a velocity-aided attitude estimation problem. *48th IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, pp. 1297-1304.
- Boyd, I. L., Kato, A., & Ropert-Coudert, Y. (2004). Bio-logging science: sensing beyond the boundaries. *Memoirs of National Institute of Polar Research, special issue*, vol. 58, pp. 1-14.
- Bras, S., Cunha, R., Vasconcelos, J. F., Silvestre, C., & Oliveira, P. (2009). Nonlinear Attitude Estimation Using Active Vision and Inertial Measurements. *48th IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, pp. 6496-6501.
- Brauer, J. R. (2006). *Magnetic Actuators and Sensors*. John Wiley & Sons, Inc.
- Brown, R. G., & Hwang, P. Y. C. (1997). *Introduction to Random Signal and Applied Kalman Filtering*. John Wiley & Sons, New York.

Burger, A. E., & Shaffer, S. A. (2008). Application of tracking and data-logging technology in research and conservation of seabirds. *Auk*, vol. 125, pp. 253-264.

C

Chaibet, A., Nouveliere, L., Hima, S., & Mammar, S. (2008). Robust second order sliding mode observer for the estimation of the vehicle states. *AIP Conference Proceedings*, vol. 1019, no. 1, pp. 27-32.

Chehoi, A. (2005). *Conception et modélisation de MEMS monolithiques CMOS en technologie FSBM : application aux accéléromètres*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II.

Chevron, T., Hamel, T., Mahony, R., & Baldwin, G. (2007). Robust Nonlinear Fusion of Inertial and Visual Data for position, velocity and attitude estimation of UAV. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, Italy, pp. 2010-2016.

Chou, J. C. K. (1992). Quaternion kinematic and dynamic equations. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 53-64.

Choukroun, D., Bar-Izthack, I. Y., & Oshman, Y. (2002). A Novel Quaternion Filter. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Monterey, CA, AIAA-02-4460.

Conway, J., & Smith, D. (2001). *On quaternions and Octonions*. Wellesley, MA: A K Peters.

Cooke, S. J., Hinch, S. G., Wikelski, M., Andrews, R. D., Kuchel, L. J., Wolcott, T. G., & Butler, J. (2004). Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 19, pp. 334-343.

Crassidis, J. L., Markley, F. L., & Cheng, Y. (2007). Nonlinear attitude filtering methods. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 30, no. 1, pp. 12-28.

Crossbow Technology. (2010). www.xbow.com

Cyan. (2010). www.cyantechnology.com.

D

Davenport, P. B. (1968). A vector approach to the algebra of rotations with applications. *Technical Report TN D-4696*, NASA.

Davis, R. W. (2008). Bio-logging as a Method for Understanding Natural Systems. *IEEE International Conference on Informatics Education and Research for Knowledge-Circulating Society*, pp. 12-17.

Dejours, P. (1981). *Principles of Comparative Respiratory Physiology*. Elsevier-North-Holland Biomedical Press.

- De Laubier, A. (2008). *Etalonnage et mise en œuvre d'une centrale inertielle pour la localisation 6D d'un robot mobile*. Diplôme d'Ingénieur CNAM, Conservatoire National des Arts et Métiers, Clermont-Ferrand.
- Dennis, J. E., & Schnabel, R. B. (1983). *Numerical Methods for Unconstrained Optimization & Nonlinear Equations*, Prentice Hall, Englewood, NJ.
- Deutschmann, J., Bar-Itzhack, I., & Galal, K. (1992). Quaternion normalization in spacecraft attitude determination. *The AIAA Astrodynamics Conference*, Hilton Head Island, pp. 27-37.
- Diebel, J. (2006). *Representing Attitude: Euler Angles, Unit quaternions, and Rotation vectors*. Stanford University, Stanford, California.
- Drocourt, C. (2002). *Localisation et modélisation de l'environnement d'un robot mobile par coopération de deux capteurs omnidirectionnels*. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne.

E

- Eck, C. (2001). *Navigation Algorithms with application to Unmanned Helicopters*. Diss. ETH, no. 14402, Zurich.
- El-Hadri, A., & Benallegue, A. (2009a). Sliding Mode Observer to estimate both the Attitude and the Gyro-Bias by Using Low-Cost Sensors. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, USA, pp. 2867-2872.
- El-Hadri, A., & Benallegue, A. (2009b). Attitude estimation with gyro-bias compensation using low-cost sensors. *48th IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, pp. 8077-8082.
- Elkaim, G. H. (2001). *System identification for precision control of a wingsailed GPS-guided catamaran*. Ph. D. thesis, Stanford University, CA, USA.
- Elkaim, G. H., Decker, E. B., Olivier, G., & Wright, B. (2006). Marine Mammal Marker (MAMMARK) dead reckoning sensor for In-Situ environment monitoring. *IEEE Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, pp. 976-987.
- Elkaim, G.H., Decker, E. B., Olivier, G., & Wright, B. (2008). Initial Results from an In-Situ Environmental Monitoring Marine Mammal Tag. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Monterey, CA, pp. 912-922.
- Estrada-Sanchez, I., Rodriguez-Cortes, H., & Velasco-Villa, M. (2008). Immersion and Invariance Based Experimental Attitude Estimation for Mobile Robots with Low Acceleration Profiles. *5th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*, Mexico city, Mexico, pp. 374-379.

F

- Farrell, J. A. (2008). *Aided Navigation GPS with High Rate Sensors*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Farrell, J. A., & Barth, M. (1998). *The Global Positioning System and Inertial Navigation*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Farahmand, F., Khadivi, K. O., & Rodrigues, J. P. C. (2009). Improving Radiation Oncology using a Low-cost Wireless Accelerometer. *5th IEEE International Workshop on Performance and Management of Wireless and Mobile Networks*, Zurich, Switzerland.
- Fossard, A. J., & Floquet, T. (2002). *An overview of classical sliding mode control*. Sliding mode in control engineering, CRC Press, pp. 1-27.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, New York.
- Fourati, H., Afilal, L., Manamanni, N., & Handrich, Y. (2008a). Modélisation et développement d'un microsystème embarqué pour la navigation à l'estime : Application à l'étude du comportement locomoteur et de la dépense énergétique chez l'homme et l'animal sauvage. *12^{èmes} édition forum INNOVACT*, Reims, France.
- Fourati, H., Afilal, L., Manamanni, N., & Handrich, Y. (2008b). Data fusion solution for orientation of a slow-moving rigid body: Bio-logging application. *9th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control and computer engineering (STA)*, Sousse, Tunisia.
- Fourati, H., Afilal, L., Manamanni, N., & Handrich, Y. (2009a). Fusion de mesures inertielles pour l'estimation de l'attitude et des accélérations propres. *3^{èmes} Journées Nationales MACS, JDMACS*, Angers, Mars.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2009b). Rigid body motions estimation using inertial sensors: Bio-logging application. *7th IFAC Symposium on Modelling and Control in Biomedical Systems (MCBMS)*, Alborg, Denmark, pp. 431-436.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2009c). Nonlinear attitude estimation based on fusion of inertial and magnetic sensors: Bio-logging application. *2nd IFAC International conference on intelligent control systems and signal Processing (ICONS)*, Istanbul, Turkey.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2009d). A rigid body attitude estimation for Bio-logging application: A quaternion-based nonlinear filter approach. *IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, St. Louis, USA, pp. 558-563.

- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2009e). An investigation of gyroscope measurements benefits in orientation and Body acceleration estimation. *10th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control and computer engineering (STA)*, Hammamet, Tunisia.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2009f). Sensors-based data fusion solution design for 3D motion estimation with application in Bio-logging. *International Journal on Sciences and Techniques of Automatic control and computer engineering (IJ-STA)*, vol. 3, no. 2, pp. 1012-1031.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2010a). Reconstitution de l'orientation et des accélérations corporelles à l'aide de capteurs inertiels et magnétiques: Application à l'écophysiologie de l'animal sauvage. *6^{èmes} Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA)*, Nancy, France.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., Van Hove, P., & Handrich, Y. (2010b). A complementary observer-based approach for the estimation of motion in rigid bodies using inertial and magnetic sensors. *IEEE Multi-Conference on Systems and Control (Conference on Control Applications) (IEEE MSC-CCA)*, Yokohama, Japan, pp. 422-427.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2010c). Sensing technique of dynamic marine animal's attitude by use of low-cost inertial and magnetic sensors. *8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS)*, Rostock-Warnemünde, Germany, pp. 318-323.
- Fourati, H., Manamanni, N., Ben Jemaa, A., Afilal, L., & Handrich, Y. (2010d). A quaternion-based Complementary Sliding Mode Observer for attitude estimation: application in free-ranging animal motions. *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Atlanta, USA.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2011a). A nonlinear filtering approach for the attitude and Dynamic Body Acceleration estimation based on inertial and magnetic sensors: Bio-logging application. *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no.1, pp. 233-244.
- Fourati, H., Manamanni, N., Afilal, L., & Handrich, Y. (2011b). Posture and body acceleration tracking by inertial and magnetic sensing: Application in behavioural analysis of free-ranging animals. *Biomedical Signal Processing and Control (BSPC)*, vol. 6, no. 1, pp. 94-104.
- Frey, B., & Crassin, C. (2003). *Projet Quaternions*. Rapport de projet, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

G

GLI Interactive LLC. (2010). www.motionnode.com.

Gallagher, A., Matsuoka, Y., & Ang, W. T. (2004). An efficient real-time human posture tracking algorithm using low-cost inertial and magnetic sensors. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, pp. 2967-2972.

Gebre-Egziabher, D., Elkaim, G. H., Powell, J. D., Parkinson, B. W. (2000). A Gyro-Free Quaternion-Based Attitude Determination System Suitable for Implementation Using Low Cost Sensors. *IEEE Position, Location and Navigation Symposium*, San Diego, CA, USA, pp. 185-192.

Gebre-Egziabher, D., Hayward, R. C., & Powell, J. D. (2004). Design of Multi-Sensor Attitude Determination Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 2, pp. 627-649.

Goldbogen, J. A., Calambokidis, J., Shadwick, R. E., Oleson, E. M., McDonald, M. A., & Hildebrand, J. A. (2006). Kinematics of foraging dives and lunge-feeding in fin whales. *The Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 7, pp. 1231-1244.

Goldstein, H. (1980). *Classical Mechanics*. 2nd Ed. Reading, MA: Addison-Wesley.

Gopel, W., Hesse, J., & Zemel, J. N. (1989). *Magnetic sensors, volume 5, Sensors A comprehensive survey*. VCH, Verlagsgesellschaft.

Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. (2001). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons, Inc.

Groscolas, R., Viera, V., Guerin, N., Handrich, Y., & Côté, S. (2010). Heart rate as a predictor of energy expenditure in undisturbed fasting and incubating penguins. *Journal of Experimental Biology*, vol. 213, no. 1, pp. 153-160.

Guerrero-Castellanos, J. F. (2008). *Estimation de l'attitude et commande borne en attitude d'un corps rigide: Application à un hélicoptère à quatre rotors*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

Guerrero-Castellanos, J. F., Hably, A., Marchand, N., Lasecq, S. (2007). Bounded attitude stabilization: Application on four-rotor helicopter. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp. 730-735.

Guerrero-Castellanos, J. F., Lasecq, S., Marchand, N., & Delmare. (2005). Low-cost air data attitude heading reference system for the tourism airplane applications. *IEEE Sensors*, Irvine, CA.

H

- Halsey, L. G., Handrich, Y., Fahlman, A., Schmidt, A., Bost, C. A., Holder, R. L., Woakes, A. J., & Butler, P. J. (2007). Fine-scale analyses of diving energetics in king penguins *Aptenodytes patagonicus*: how behaviour affect costs of a foraging dive. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 344.
- Halsey, L. G., Handrich, Y., Rey, B., Fahlman, A., Woakes, A. J., & Butler, P. J. (2008). Recovery from swimming-induced hypothermia in king penguins: effects of nutritional condition. *Physiological and Biochemical Zoology*, vol. 81, no. 4, pp. 434-441.
- Hamdi, F., Manamanni, N., Messai, N., & Benmahamed, K. (2009). Hybrid observer design for linear switched system via Differential Petri Nets. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 310-322.
- Hamel, T., & Mahony, R. (2006). Attitude estimation on SO(3) based on direct inertial measurements. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida*, pp. 2170-2175.
- Handrich, Y., Bevan, R. M., Charrassin, J. -B., Butler, P. J., Pütz, K., Lage, J., Woakes, A., & Le Maho, Y. (1997). Hypothermia in foraging king penguin. *Nature*, vol. 388, no. 6637, pp. 64-67.
- Hart, K. M., & Hyrenbach, K. D. (2009). Satellite telemetry of marine megavertebrates: the coming of age of an experimental science. *Endangered Species Research*, vol. 10, pp. 9-20.
- Higgins, w. (1975). A comparison of complementary and Kalman filtering. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 321-325.
- Hogg, R. W., Rankin, A. L., Roumeliotis, S. I., McHenry, M. C., Helmick, D. M., Bergh, C. F., & Matthies, L. (2002). Algorithms and Sensors for Small Robot Path Following. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA*, pp. 3850-3857.
- Hong, S. K. (2003). Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV). *Sensors and Actuators*, vol. 107, no. 2, pp. 109-118.
- Hua, M.-D. (2010). Attitude estimation for accelerated vehicles using GPS/INS measurements. *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 7, pp. 723-732.

I

- IGRF. (2010). www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcPointIGRF.
- Intersense. (2010). www.Intersense.com
- IPHC-DEPE. (2010). www.iphc.cnrs.fr/-Groupe-BioLogging-.html.

J

Johnson, M. P., & Tyack, P. L. (2003). A Digital Acoustic Recording Tag for Measuring the Response of Wild Marine Mammals to Sound. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 3-12.

Jurman, D., Jankovec, M., Kamnik, R., & Topic, M. (2007). Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system. *Sensors and Actuators A*, vol. 138, no. , pp. 411-420.

K

Kuipers, J. B. (1999). *Quaternion and Rotation Sequences*, Princeton, NJ: Princeton University Press.

Kooyman, G. L. (2004). Genesis and evolution of bio-logging devices: 1963-2002. *Memoirs of National Institute of Polar Research, special issue*, vol. 58, pp. 15-22.

Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35-45.

Köprübasi, K., & Thein, M. W . L. (2006). Attitude and Angular Rate Estimation Using the Sliding Mode Observer With Additive Quaternion Corrections. *IEEE American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, pp. 3302-3307.

Khalil, H. (2002). *Nonlinear Systems*. 3rd edition, NJ: Prentice-Hall.

L

Ladetto. Q. (2003). *Capteurs et Algorithmes pour la localisation Autonome en Mode Pédestre*. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Laila, D. S., Lovera, M., & Astolfi, A. (2006). A numerical algorithm as an observer for spacecraft attitude determination. 45th *IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, USA, pp. 1568-1573.

Lawrence, A. (1998). *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*. 2nd Ed. Mechanical engineering series, Springer-Verlag, New York, Inc.

Lefferts, E. J., Markley, F. L., & Shuster, M. D. (1982). Kalman filtering for spacecraft attitude estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 5, no. 5, pp. 417-429.

Le Maho. Y. (2003). How animals work. *Nature*, vol. 425, no. 6954, pp. 129.

Lenz, J. E. (1990). A Review of Magnetic Sensors. *IEEE*, vol. 78, no. 6, pp. 973-989.

- Leroy, P. (2007). *Mesures des Champs Magnétiques Alternatifs et Continus dans les Plazmas Naturels : Développement d'un Magnétomètre Search-Coil à Bande Etendue*. Thèse de Doctorat, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines.
- Liu, K., Liu, T., Shibata, K., Inoue, Y., & Zheng, R. (2009). Novel approach to ambulatory assessment of human segmental orientation on a wearable sensor system. *Journal of Biomechanics*, vol. 42, no. 16, pp. 2747-2752.
- Luenberger, D. G. (1964). Observing the state of a linear system. *IEEE Transactions on Military Electronics*, vol. 8, pp. 74-80.
- Luinge, H. J., Veltink, P. H., & Baten, C. T. M. (2007). Ambulatory measurement of arm orientation. *Journal of Biomechanics*, vol. 40, no. 1, pp. 78-85.

M

- Macdonald, D. W., & Newman, C. (2002). Badger (Meles meles) population dynamics in Oxfordshire, UK: numbers, density and cohort life histories, and possible role of climate change in population growth. *Journal of Zoology*, vol. 256, no. 1, pp. 121-138.
- Macmillan, S., & Maus, S. (2005). International Geomagnetic Reference Field-the tenth generation. *Earth Planets Space*, vol. 57, pp. 1135-1140.
- Mahony, R., Hamel, T., & Pflimlin, J. M. (2008). Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 5, pp. 1203-1218.
- Manamanni, N., Afilal, L., Moughamir, S., Cherouali, T., & Zaytoon, J. (2005). Characterization and implementation of mechanical stimulation on isokinetic machines. *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 9, pp. 1151-1161.
- Marandi, S. R., & Modi, V. J. (1987). A Preferred Coordinate System and Associated Orientation Representation in Attitude Dynamics. *Acta Astronautica*, vol. 15, no. 11, pp. 833-843.
- Marquardt, D. W. (1963). An Algorithm for the Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431-441.
- Martin, P., & Salaün, E. (2007). Invariant Observers for attitude and heading estimation from low-cost inertial and magnetic sensors. *46th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, USA, pp. 1039-1045.
- Martin, P., & Salaün, E. (2008a). Design and Implementation of a Low-Cost Aided Attitude and Heading Reference System. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Honolulu, Hawaii.

- Martin, P., & Salaün, E. (2008b). A General Symmetry-Preserving Observer for Aided Attitude Heading Reference Systems. *47th IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, pp. 2294-2301.
- Martin, P., & Salaün, E. (2010). Design and implementation of a low-cost observer-based attitude and heading reference system. *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 7, pp. 712-722.
- Markley, F. L., & Mortari, D. (2000). Quaternion Attitude Estimation using Vector Observations. *Journal of the Astronautical Sciences*, vol. 48, no. 2, 3, pp. 359-380.
- Markley, F. L. (2003). Attitude error representations for Kalman filtering. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 63, no. 2, pp. 311-317.
- Matthews, A. (1990). Utilization of fiber optic gyros in inertial measurements units. *Navigation*, vol. 37, no. 1, pp. 17-38.
- Memsense. (2010). www.memsense.com.
- Merrill, R. T., McElhinny, M. W. & McFadden, P. L. (1996). *The Magnetic Field of the Earth*. International Geophysics Series, vol. 63.
- Metni, N., Pflimlin, J. M., Hamel, T., & Souères, P. (2006). Attitude and gyro bias estimation for a VTOL UAV. *Control Engineering Practice*, vol. 14, no. 12, pp. 1511-1520.
- Microbotics. (2010). www.microboticsinc.com.
- MicroStrain. (2010). www.microstrain.com.
- Miller, P. J. O., Johnson, M. P., Tyack, P. L., & Terray, E. A. (2004). Swimming gaits, passive drag and buoyancy of diving sperm whales *Physeter macrocephalus*. *The Journal of Experimental Biology*, vol. 207, pp. 1953-1967.
- Mitani, Y., Katsufumi, S., Ito, S., Cameron, M. F., Siniff, D. B., & Naito, Y. (2003). A method for reconstructing three-dimensional dive profiles of marine mammals using geomagnetic intensity data: results from two lactating Weddell seals. *Polar Biology*, vol. 26, no. 5, pp. 311-317.
- Morgado, M., Oliveira, P., Silvestre, C., & Vasconcelos, J. F. (2007). Vehicle Dynamics Aiding Technique for USBL/INS Underwater Navigation System. *IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS)*, Bol, Croatia.
- Muramoto, H., Ogawa, M., Suzuki, M., & Naito, Y. (2004). Little Leonardo digital data logger: its past, present and future role in bio-logging science. *Memoirs of National Institute of Polar Research, special issue*, vol. 58, pp. 196-202.

N

Naito, Y. (2004). New steps in bio-logging science. *Memoirs of National Institute of Polar Research, special issue*, vol. 58, pp. 50-57.

Naito, Y., Sakamoto, W., Uchida, I., Kureha, K., & Ebisawa, T. (1990). Estimation of migration route of the loggerhead turtle *Caretta caretta* around the nesting ground. *Nippon Suisan Gakkaishi*, vol. 56, no. 2, pp. 255-262.

Navionex. (2010). www.navionex.com.

NIPR. (2010). <http://polaris.nipr.ac.jp/~penguin/oogataHP/IndexC.html>.

O

Ojeda, L., & Borenstein, J. (2007). Non-GPS Navigation for Security Personnel and First Responders. *Journal of Navigation*, vol. 60, no. 3, pp. 391-407.

P

Parent, A. (2008). *Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des micro-gyromètres vibrants*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Paris, France, 2008.

Phillips, W., Hailey, C., & Gebert, G. (2001). A review of attitude representations used for aircraft kinematics. *AIAA Journal of Aircraft*, vol. 38, no. 4, pp. 718-737.

Pflimlin, J. M. (2006). *Commande d'un minidrone à hélice carénée : De la stabilisation dans le vent à la navigation autonome*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France.

R

Rajagopal, S. (2008). *Personal Dead Reckoning System with Shoe Mounted Inertial Sensors*. Master's Degree Project, Stockholm, Sweden.

Rehbinder, H., & Hu, X. (2000). Nonlinear state estimation for rigid-body motion with low-pass sensors. *Systems and Control Letters*, vol. 40, no. 3, pp. 183-190.

Rehbinder, H., & Ghosh, B. K. (2003). Pose estimation using line-based dynamic vision and inertial sensors. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 2, pp. 186-199.

Ren, H., & Kasanzides, P. (2009). Hybrid Attitude Estimation for Laparoscopic Surgical tools: A Preliminary Study. *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Minneapolis, Minnesota, USA.

Ripka, P. (2001). *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House, MA, Inc.

- Roetenberg, D., Slycke, P. J., & Veltink, P. H. (2007). Ambulatory position and orientation tracking fusing magnetic and inertial sensing. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 5, pp. 883-890.
- Robert-Coudert, Y., Beaulieu, M., Hanuise, N., & Kato, A. (2009). Diving into the world of biologging. *Endangered Species Research*, vol. 10, pp. 21-27.
- Robert-Coudert, Y., & Wilson, R. (2005). Tends and perspectives in animal-attached remote sensing. *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 3, no. 8, pp. 437-444.
- Roumeliotis, S. I., Sukhatme, G. S., & Bekey, G. A. (1999). Smoother based 3D Attitude Estimation for Mobile Robot Localization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, USA, pp. 1979-1986.
- Rutz, C., & Hays, G. C. (2009). New frontiers in biologging science. *Biology letters*, vol. 5, no. 3, pp. 289-292.

S

- Saadaoui, H., Manamanni, N., Djemai, M., Barbot, J.-P., & Floquet, F. (2006). Exact differentiation and sliding mode observer for switched mechanical systems. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, Special Issue*, vol. 65, no. 5, pp. 1050-1069.
- Sabatini, A. M. (2006). Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 7, pp. 1346-1356.
- Sbg systems. (2010). www.sbg-systems.com.
- Salcudean, S. (1991). A globally convergent velocity observer for rigid body motion. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 12, pp. 1493-1497.
- Salmeron-Quiroz, B. B. (2007). *Fusion de données multi-capteurs pour la capture de mouvement*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Sato, K., Mitani, Y., Cameron, M. F., Siniff, D. B., & Naito, Y. (2003). Factors affecting stroking patterns and Body angle in diving Weddell seals under natural conditions. *Journal of experimental Biology*, vol. 206, pp. 1461-1470.
- Schaub, H., & Junkins, J. L. (1996). Stereographic orientation Parameters for Attitude Dynamics: A Generalization of the Rodrigues Parameters. *Journal of the Astronautical Sciences*, vol. 44, no. 1, pp. 1-19.
- Schmidt-Nielsen, K. (1997). *Animal Physiology: Adaptation and Environment*. Cambridge University Press.
- Scholander, P. F. (1940). Experimental investigations on the respiratory function in diving mammals and birds. *Hvalradets Skrifter*, vol. 22, pp. 1-131.

- Seddiki, L., Guelton, K., & Zaytoon, J. (2010). Concept and Takagi-Sugeno descriptor tracking controller design of a CMC lower-limb rehabilitation device. *IET Control Theory & Applications*, vol. 4, no. 8, pp. 1047-1420.
- Shepard, E. L. C., Wilson, R. P., Quintana, F., Laich, A. G., Liebsch, N., Albareda, D. A., Halsey, L. G., Gleiss, A., Morgan, D. T., Myers, A. E., Newman, C., & Macdonald, D. W. (2008). Identification of animal movement patterns using tri-axial accelerometry. *Endangered Species Research*, ISSN 1863-5407.
- Shuster, M. D. (1993). A survey of attitude representations. *Journal of the Astronautical Sciences*, vol. 41, no. 4, pp. 439-517.
- Shuster, M. D., & Oh, S. D. (1981). Three-Axis Attitude Determination from vector Observations. *Journal of Guidance and Control*, vol. 4, no. 1, pp. 70-77.
- Singh, S. P. N., & Waldron, K. J. (2005). Attitude Estimation for Dynamic Legged Locomotion Using Range and Inertial Sensors. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 1663-1668.
- Sirtrack. (2010). www.sirtrack.com.
- Slimi, H., Sentouh, C., Mammar, S., & Nouveliere, L. (2008). Sensor position identification and vehicle state estimation using the extended Kalman filter. *AIP Conference Proceedings*, vol. 1019, no. 1, pp. 41-46.
- Slotine, J. J.E., Hedrick, J. K., & Misawa, A. (1987). On sliding Observers for Nonlinear Systems. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 109, pp. 245-252.
- Sontag, E. D., & Wang, Y. (1995). On characterization of the input-to-state stability property. *Systems & Control Letters*, vol. 24, pp.351-359.
- Soresina, M. (2010). *Problems of determining speed in terrestrial animals; a suggestion for use in dead-reckoning systems*. Ecophysiology and Ethology Master Degree, University of Strasbourg.
- Spong, M., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modeling and Control*. John Wiley and Sons, Inc.

T

- Tanaka, S., & Nishifuji, S. (1996). Automatic on-line Measurement of ship's Attitude by Use of Servo-Type Accelerometer and Inclinometers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 45, no. 1.
- Tayebi, A. (2008). Unit Quaternion-based Output Feedback for the attitude Tracking Problem. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 6, pp. 1516-1520.

Thienel, J., & Sanner, R. M. (2003). A coupled nonlinear spacecraft attitude controller and observer with an unknown constant gyro bias and gyro noise. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 11, pp. 2011-2014.

Titterton, D. H., & Weston, J. L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd Ed, UK: The institution of Electrical Engineers.

Tyack, P. L., Johnson, M. P., & Madsen, P. T. (2005). Three-dimensional beam pattern of regular sperm whale clicks confirms bent-horn hypothesis. *Acoustical Society of America*, vol. 117, no. 3, pp. 1473-1485.

U

Utkin, V. I. (1992). *Sliding modes in control optimization*. Springer-Verlag, Berlin.

V

Vaganay, J., Aldon, M. J., & Fournier, A. (1993). Mobile Robot Attitude Estimation by Fusion of Inertial Data. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, USA, pp. 277-282.

Vasconcelos, J. F., Silvestre, C., & Oliveira, P. (2008a). A Nonlinear Observer for Rigid Body Attitude Estimation Using Vector Observations. *17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea, pp. 8599-8604.

Vasconcelos, J. F., Silvestre, C., & Oliveira, P. (2008b). A Nonlinear GPS/IMU Based Observer for Rigid Body Attitude and Position Estimation. *47th IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, pp. 1255-1260.

Vasconcelos, J. F., Silvestre, C., Oliveira, P., Batista, P., & Carneira, B. (2009). Discrete time-varying attitude complementary filter. *IEEE American Control Conference*, St. Louis, USA, 4056-4061.

Vik, B., & Fossen, T. I. (2000). A Nonlinear Observer for Integration of GPS and Inertial Navigation Systems. *Modeling, Identification and Control*, vol. 21, no. 4, pp. 193-208.

W

Wahba, G. (1965). A least squares estimate of spacecraft attitude. *SIAM Review*, vol. 7, no. 3, pp. 409.

Wahba, G. (1966). A least squares estimate of spacecraft attitude. *SIAM Review*, vol. 8, no. 3, pp. 384-386.

Wang, F., & Jin, H. (2009). Design a mini-type attitude measurement system for self-propelled model trials. *Measurement*, vol. 42, no. 6, pp. 954-962.

- Watanabe, S., Izawa, M., Kato, A., Ropert-Coudert, Y., & Naito, Y. (2005). A new technique for monitoring the detailed behaviour of terrestrial animals: A case study with the domestic cat. *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 94, no. 1, pp. 117-131.
- Watson Industries. (2010). www.watson-gyro.com.
- Welch, G., & Bishop, G. (2001). An Introduction to the Kalman Filter. *International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, Course 8, Los Angeles, CA.
- Wertz, J. R. (2002). *Spacecraft Attitude determination and Control*. Astrophysics and Space Science Library.
- Wiener, N. (1949). *Extrapolation, Interpolation and smoothing of stationary time series*. New York: John Wiley and Sons.
- Wildlife computers. (2010). www.wildlifecomputers.com.
- Wilson, R. P., Liebsch, N., Davies, I., Quintana, M., & others. (2007). All at sea with animal tracks; methodological and analytical solutions for the resolution of movement. *Deep-Sea Research II*, vol. 54, pp. 193-210.
- Wilson, R. P., Shepard, E. L. C., & Liebsch, N. (2008). Prying into the intimate details of animal lives: use of a daily diary on animals. *Endangered Species Research*, vol. 4, no. 1-2.
- Wilson, R. P., White, C. R., Quintana, F., Halsey, L. G., Liebsch, N., Martin, G. R., & Butler, P. J. (2006). Moving towards acceleration for estimates of activity-specific metabolic rate in free-living animals: the case of the cormorant. *Journal of Animal Ecology*, vol. 75, pp. 1081-1090.

X

- Xsens Technologies. (2010). www.xsens.com.

Y

- Yazdi, N., Ayazi, F., & Najafi, K. (1998). Micromachined Inertial Sensors. *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1640-1659.
- Yun, X., & Bachmann, E. R. (2006). Design, Implementation and Experimental Results of a Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 6, pp. 1216-1227.
- Yun, X., Bachmann, E. R., McGhee, R. B., Whalen, R. H., Roberts, R. L., Knapp, R. G., Healey, A. J., & Zyda, M. J. (1999). Testing and Evaluation of an Integrated GPS/INS System for Small AUV Navigation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 396-404.

Z

- Zhou, H., Stone, T., Hu, H., & Harris, N. (2008). Use of multiple wearable inertial sensors in upper limb motion tracking. *Medical Engineering & Physics*, vol. 30, no. 1, pp. 123-133.
- Zhu, R., Sun, D., Zhou, Z., & Wang, D. (2007). A linear fusion algorithm for attitude determination using low cost MEMS-based sensors. *Measurement*, vol. 40, no. 3, pp. 322-32.

